



MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA
INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZACIÓN
COLORADO STATE UNIVERSITY
INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN
PARA LA AGRICULTURA

**MEMORIAS DEL
PRIMER TALLER NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN SOBRE
CUENCAS EXPERIMENTALES**

*Documento elaborado
por la Comisión
Editora de las Memorias del Taller*



Montevideo - Uruguay
1984

Centro Interamericano de
Documentación e
Información Agrícola

13 AGO 1987

IICA — CIDIA

IICA



MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA
INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZACIÓN
COLORADO STATE UNIVERSITY
INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN
PARA LA AGRICULTURA

**MEMORIAS DEL
PRIMER TALLER NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN SOBRE
CUENCAS EXPERIMENTALES**

Montevideo - Uruguay
1984

00007519



INDICE

Perspectivas de Investigación sobre Cuencas en Uruguay. Ing. Agr. Ricardo Cayssials	7
The Use of Experimental Watersheds in Solving Land Management Problems. Dr. John D. Hewlett	27
Carac. del Clima y de las Cuencas Naturales que Influyen en los Procesos Hidrológicos. Ing. Walter Corsi	49
Estado Actual de la Cartografía, Caracterización y Clasificación de Suelos en el Uruguay. Ing. Agr. Leonel Aguirre	87
Antecedentes y Metodología de la Comisión Nal. de Estudio Agroeconómico de la Tierra. Ing. Agr. Raúl Ponce de León	105
Orientación del Mejoramiento de Pasturas en el Uruguay. Ing. Agr. Fernando Santiñaque	113
Degradación de Tierras. Identificación y Diagnóstico del Problema. Ing. Agr. Rubén Puentes	125
Problemas Hidrológicos y de Erosión en las Cuencas Hidroeléctricas. Acad. Ing. Roberto Maisonnave	163
A Survey of Experimental Wathrsheds in the USA. Prof. Richard H. Hawkins	173
Selection and Instrumentation of Experimental Watersheds. Prof. Freeman M. Smith	207
Calibration and Detection of Changes I in Experimental Watersheds. Prof. José D. Salas	257
Mathematical Models: Reseach Tools for Experimental Watersheds. Dr. Doon De Coursey	301
Transfer of Experimental Watershed Results to River Basins. Roger P. Betson	341
Hydrologic Changes Due to Water Resources Development. Prof. Vujica Yevjevich	387
Propuesta para un Estudio de Morfología de la Cuenca del Río Tacuarembó Utilizando Imágenes de Satélite. Lic. Ana María C. Martínez	417

Propuesta de Dos Modificaciones al Balance Hídrico de Suelos según Thornthwaite y Mather (1955) y su Aplicación en el Estudio Hidrológico de la Cuenca del Río Ibirapuita en el Estado del Río Grande do Sul, Brasil. Ing. José Barrios	479
Índice de Erosividad de Lluvias en Uruguay. (Factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo). Ing. F. García, Ing. Julio Pannone	503
Caracterización e Instrumentación de Dos Cuencas en el Uruguay Ing. Agr. Julio C. Pannone, Ing. Agr. Ariel Szogi	521

P R E S E N T A C I O N

El Gobierno del Uruguay aprobó el 6 de agosto de 1980 un Plan Preliminar de Colaboración Recíproca en Relación al Tema de Conservación y Manejo de Tierras y Aguas a ser desarrollado por el Ministerio de Agricultura y Pesca y el IICA. En el texto de la Resolución Oficial se define el problema general a cuya solución debe abocarse el Plan, como "un considerable avance del deterioro y pérdida de productividad de los suelos, así como una concentración del fenómeno sobre suelos aptos para la agricultura". Más adelante el mismo documento define el objetivo general de la acción del Plan con estas palabras: "instrumentar acciones tendientes a encauzar y concretizar un uso racional de las tierras y aguas, a los efectos de maximizar los beneficios económicos, manteniendo la productividad de sus recursos naturales suelos y aguas". Finalmente el mismo documento señala entre los objetivos intermedios del Plan: "apoyar la investigación sobre Conservación y Manejo de Tierras, Aguas y Cubierta Vegetal a nivel de Cuencas Hidrográficas".

De acuerdo con lo expuesto, los organismos participantes del Plan de Colaboración, recibieron la misión de investigar nuevas formas de uso de la tierra o sea estudiar nuevos sistemas de producción agropecuaria y forestal que, junto con maximizar beneficios económicos sean garantía de conservación de la productividad de las tierras. También se indica que dichos estudios podrán ser realizados a nivel de micro-cuencas hidrográficas experimentales o sea a escala predial.

El concepto de cuenca experimental ha sido definido por C.Toebes y V.Ouryvaeb ("Representative and Experimental basins", UNESCO 1970), como cuenca hidrográfica homogénea en suelos, vegetación y características físicas en la cual se modifica deliberadamente una o más de sus características y se estudian los efectos de estas modificaciones sobre su comportamiento, rasgos hidrológicos y edafológicos. Los mismos autores consideran que -consecuentemente- el organismo de investigación que intente aplicar esta idea debe ser propietario o arrendatario del predio que contiene la cuenca, para así estar en situación de manejar la tierra libremente, e introducir en ella las modificaciones que estime convenientes.

Aunque en otros países existen cuencas experimentales desde comienzos de este siglo, (en EE.UU. existen 330 unidades en operación) en América Latina y el Caribe esta tecnología no ha sido prácticamente utilizada, y sólo en la última década se ha tenido conocimiento de su iniciación en Brasil y Argentina. Es por esta razón que fue realizado en Uruguay este PRIMER TALLER NACIONAL SOBRE INVESTIGACION EN CUENCAS EXPERIMENTALES y fueron invitados a participar en él, distinguidos especialistas de organizaciones nacionales y de organizaciones de investigación de los EE.UU. como son la Autoridad del Valle del Tennessee, el Servicio de Investigación Agrícola del Depto. de Agricultura, la Universidad George Washington en Washington D.C. y las Universidades de los Estados de Utah, Georgia y Colorado. Con esta última prestigiosa universidad el IICA mantiene un Convenio de Cooperación Técnica.

En estas memorias se presentan temas como: Relevamiento de Cuencas Experimentales en EE.UU.; Uso de Cuencas Experimentales en la Resolución de Problemas de Manejo de Tierras; Problemas Hidroló-

gicos y de Erosión en Aprovechamientos Hidroeléctricos; Selección e Instrumentación de Cuencas Experimentales; Colaboración y Detección de Cambios en Cuencas Experimentales; Modelos Matemáticos como Herramientas para Cuencas Experimentales; Transferencia de Resultados de Cuencas Experimentales a Grandes Cuencas Hidrográficas; Cambios Hidrológicos como Resultado de Desarrollo de Aprovechamientos Hídricos. Aparte de lo anterior los especialistas nacionales y del IICA presentaron diferentes trabajos que caracterizaron muy bien el alto nivel de los estudios que sobre temas afines se han hecho en el país y en la región.

El establecimiento en Uruguay de una o más cuencas experimentales significaría disponer de una nueva modalidad para realizar investigaciones sobre materias tales como: manejo de bosques, utilización de pastizales, diseño de nuevos sistemas agropecuarios de producción, diseño y evaluación de prácticas de ingeniería agrícola para control de erosión, etc., todo ello realizado en forma sistemática y dentro de una Unidad Experimental que puede ser útil al país durante varias décadas.

La edición de esta publicación estuvo a cargo de una Comisión integrada por los Ings.Agrs.José Barrios y Ricardo Cayssials, responsables por el Plan de Colaboración MAP/IICA, con la asistencia del Ing.Agr. Julio Pannone. Por parte del IICA, el Ing. José Barrios participó, dentro del Plan mencionado en la promoción de la asistencia de la Misión de la Universidad de Colorado en 1982 y en la realización del Primer Taller de 1983 y prevee la continuación de acciones para la concreción de los objetivos perseguidos.

La Dirección del Area Sur del IICA confía que este esfuerzo realizado por el Plan de Colaboración vigente sea bien recibido por las Organizaciones Nacionales interesadas en Investigación Agrícola y que el país pueda aprovechar estas nuevas ideas para establecer una o más cuencas experimentales y presentar a mediano plazo los sistemas de producción agropecuaria o forestal buscados, cuyo uso pasará a ser garantía de permanencia de la productividad de la tierra, y por ende parte en la estabilidad de la economía básica nacional.

Emilio Montero Baeza
Director
Area Sur y Oficina IICA/Uruguay

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

PERSPECTIVAS DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS
EN URUGUAY

Ing. Agr. Ricardo Cayssials

Montevideo - Uruguay

INTRODUCCION

Esta comunicación al "Primer Taller Nacional de Investigación sobre Cuencas-Experimentales", pretende por sobre todas las cosas, motivar a todos los participantes a los efectos de integrarse efectivamente a las actividades programadas.

El éxito de este Taller, dependerá de la efectiva integración y participación de todos Uds. Vuestra opinión, no solamente es necesaria, sino que es imprescindible para que los objetivos del encuentro puedan realmente cumplirse.

Se ha elegido el carácter de Taller, justamente para señalar el deseo, de que este encuentro, se transforme en un efectivo y fructífero intercambio de ideas y opiniones técnicas, a los efectos de que entre todos, logremos elaborar el camino más adecuado, en este tipo de investigaciones sobre Cuencas Experimentales, que como veremos pueden servir de herramientas poderosas, para obtener criterios más sólidos en relación, al uso-manejo y conservación, de nuestros recursos naturales disponibles.

Deseo desde ya, agradecer a todos Uds. vuestra presencia y el aporte generoso que seguramente realizarán en el transcurso de esta semana que estaremos trabajando juntos.

Para el desarrollo de esta primer exposición en este Taller, se seguirá el siguiente temario:

1. Se abordará, a manera de introducción el gran tema del agua y el desarrollo, donde se recordará la importancia capital que tiene el agua en todas las actividades humanas.
2. Se recordará, el ciclo hidrológico o del agua, algo que todos Uds. conocen, pero que me parece oportuno visualizar esquemáticamente, para poder interiorizarnos en la problemática que nos preocupa.

3. Se analizará la cuenca hidrográfica, desde una perspectiva ecosistémica, señalando su estructura y su funcionalidad.
4. Se realizará una síntesis, a la luz del marco conceptual considerado, sobre los diferentes caminos que se pueden seguir para enfrentar los problemas que existen en nuestro ecosistema.
5. Se tratará de fundamentar muy especialmente, ¿por qué se considera que la investigación en "Cuencas Experimentales", puede ser una poderosa herramienta para obtener valiosa información a los efectos de orientar un uso más racional de los recursos suelo-agua-pasturas-bosque?
6. Por último, se señalarán una serie de conclusiones finales, que pretende, como ya se dijo, solo lanzar las primeras ideas sobre la mesa de discusión, de este "Primer Taller Nacional de Investigación sobre Cuencas Experimentales".

1. EL AGUA EN EL DESARROLLO

El agua constituye un recurso natural de enorme trascendencia para el desarrollo de la humanidad, dado que todas las actividades que realiza el Hombre dependen directa o indirectamente de este recurso básico.

El agua constituye además, un elemento indispensable para todo el "ciclo vital" que transcurre en nuestro planeta tierra. Todos los seres vivos, autótrofos como heterótrofos, están constituidos por una alta proporción de agua. La vida solo se puede dar, si existe suministro adecuado y oportuno de agua.

Por otra parte, se puede asegurar que directa o indirectamente, todas las actividades productivas, necesitan en mayor o menor grado del abastecimiento de agua, con exigencias variables de calidad, cantidad y momentos o tiempos de suministro.

A manera de ejemplo, se puede recordar, que sin duda todas las actividades agrícolas, en su sentido amplio (agricultura, pecuaria y forestación), necesitarán de agua y en gran medida, los rendimientos de cosecha siempre estarán influenciados por las condiciones de suministro de tal vital elemento.

Estos rendimientos pueden ser seriamente afectados, ya sea por excesos o por déficit de agua. Así pues, los excesos provocarán la muerte del sistema radicular de los cultivos, mientras que los déficit impedirán la actividad fotosintética de las plantas. Según la magnitud de estas situaciones críticas, así como del momento en que se manifiesten de acuerdo al desarrollo fisiológico del cultivo, serán las pérdidas de rendimiento.

También las actividades ganaderas, dependerán de un adecuado suministro de agua, dado que los animales necesitan de aguadas naturales o artificiales - para poder producir carne, lana o leche y además, necesitan de alimentos tales como pasturas o granos, que para formarse, a su vez, también exigen agua.

En cuanto a las actividades industriales donde se procesarán las materias primas, también necesitan de enormes cantidades de agua. Por ejemplo, para producir una (1) tonelada de acero, se estima que necesitamos doscientos cincuenta mil (250.000 lts) litros de agua. Una (1) tonelada de papel, exige trescientos veinte y cinco mil litros (325.000 lts) y cuando se fabrica caucho sintético, el gasto sube a dos millones quinientos mil litros (2.500.000 lts) por tonelada de producto (Molina Y. 1981).

Sin agua no hay industria, de ahí que, siempre los grandes centros industriales se localizan geográficamente sobre ríos o lagos, donde la provisión de agua no sea problema.

De más está decir, que también las aglomeraciones humanas, necesitan de agua potable para poder subsistir y desarrollarse. Esto exige que la fuente de abastecimiento de agua, no solo suministre las cantidades necesarias, sino que además mantenga determinadas características cualitativas, que minimicen los costos de potabilización.

Se debe agregar a manera de síntesis, que el recurso agua, se caracteriza por ser un recurso natural polivalente, en cuanto a sus múltiples usos, tales como: Consumo humano, Riego, Hidroelectricidad, Abrevadero de ganado, - Consumo Industrial, Transporte, Pesca, Turismo, Recreación, etc.

Estas múltiples alternativas de uso, exigen determinadas condiciones en cuanto a cantidad, calidad y oportunidad del suministro del recurso, todo lo cual puede generar, en muchos casos, conflictos por el uso del agua. De ahí que sea necesario, establecer prioridades, para luego, poder planificar los distintos usos necesarios, de manera tal, de hacer un aprovechamiento integral del recurso, que beneficie lo más posible al Hombre y su comunidad.

Por otra parte, veremos más adelante, que tanto la cantidad, calidad o tiempo de suministro del agua, van a depender de la gestión antrópica del ecosistema.

Como ejemplo, señalaremos que las características físico-químicas y biológicas del agua de un embalse, dependerán en gran medida, del uso, manejo y conservación de las tierras, de toda la cuenca que abastece de agua a dicha represa.

Queda claro, que la gestión racional del recurso agua, exige una aproximación totalizante u holística porque debemos contemplar y armonizar distintos intereses así como distintos niveles de exigencia en cuanto a cantidad, calidad y tiempo de suministro del recurso y además debemos preocuparnos por las condiciones de uso, manejo y conservación de la totalidad de las tierras que constituyen la cuenca generadora del vital elemento.

En lo que tiene que ver con las inundaciones o sequías, para nuestras condiciones ambientales, se deben considerar como procesos naturales que se producen con determinada probabilidad de ocurrencia. Estos procesos naturales - pueden tener consecuencias socio-económicas serias, de acuerdo a la magnitud relativa del fenómeno en sí mismo y de acuerdo a las previsiones que el Hombre haya tomado o no.

En otras palabras, estos procesos naturales que tienen incidencias negativas evidentes sobre las actividades productivas, así como, sobre la vida social y cultural de las comunidades humanas, pueden ser minimizados, si el hombre se organiza para enfrentarlos con sabiduría.

También es justo reconocer, que el Hombre puede ser responsable de un incremento en la severidad de estas situaciones críticas. La equivocada gestión del Hombre en su entorno ecológico, puede agravar la severidad de las inundaciones, tal como es el caso, de las deforestaciones masivas de los bosques naturales o los procesos de erosión antrópica de los suelos, generados por - "sistemas de producción" no conservacionistas del recurso.

Estos hechos negativos, lamentablemente se han producido en nuestro país, así como, en los países hermanos de la Cuenca del Plata, lo que sin lugar a dudas, ha tenido incidencia sobre la severidad de las inundaciones, que recientemente hemos padecido.

Similar razonamiento, se puede seguir para el otro extremo de las sequías.

Sin ninguna duda, la práctica del sobrepastoreo, creará condiciones objetivas para que si se produce un período de déficit de agua de lluvia, como suele ocurrir en cualquier momento del año en nuestro país, la severidad de la sequía será mayor que si las pasturas están con suficiente área foliar y reservas en sus raíces, en el momento de producirse el fenómeno.

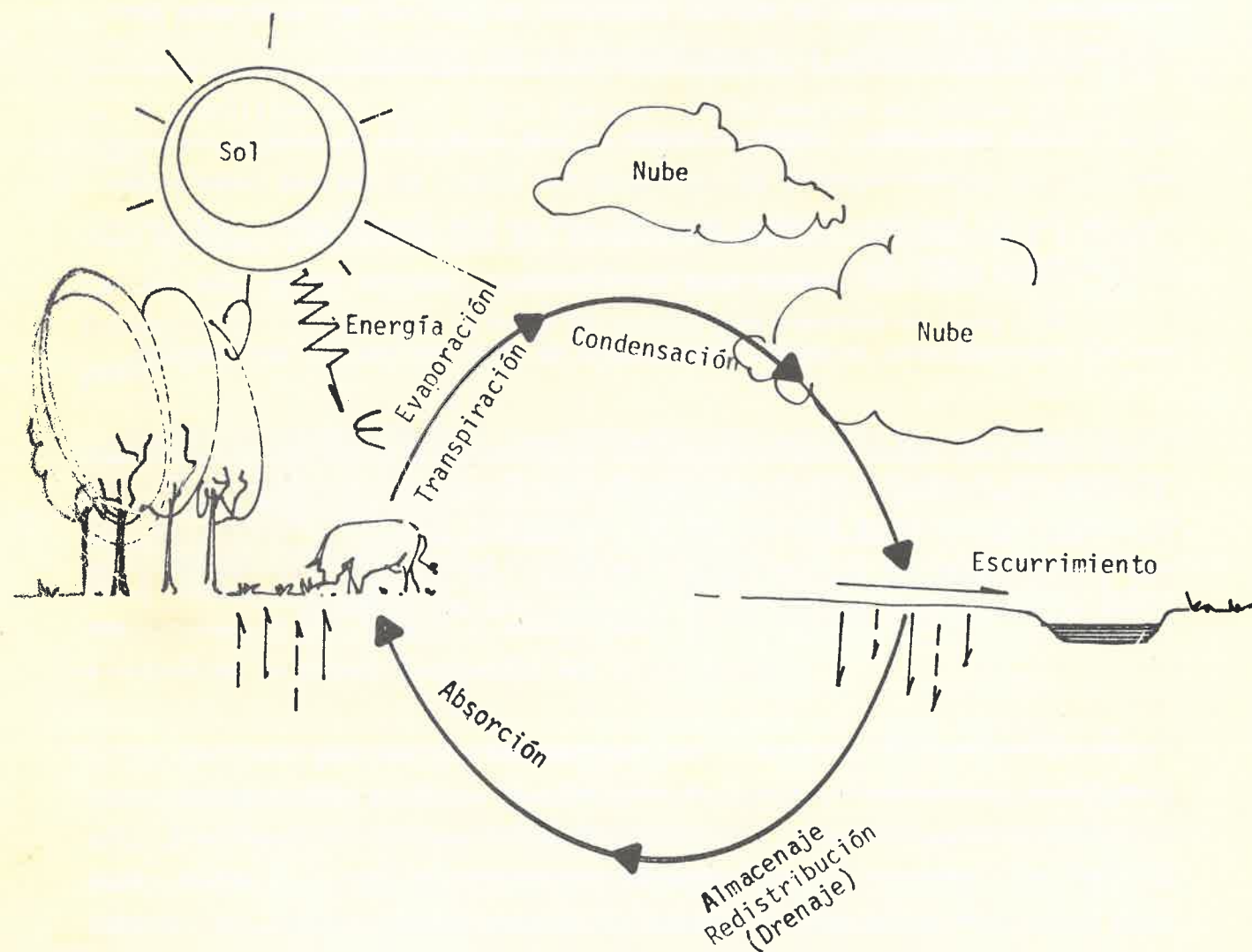
2. EL CICLO DEL AGUA

Ahora bien, para poder hacer un uso eficiente de los recursos naturales suelo, agua, pasturas, bosques, etc., debemos antes que nada, preocuparnos por estudiar las leyes que rigen la génesis y evolución de dichos recursos, para luego saber como utilizarlos y manejarlos en provecho del Hombre, sin provocar daños irreparables sobre los mismos.

Es con esta perspectiva, que vamos a recordar el ciclo hidrológico, algo que seguramente todos conocen, pero que me parece de interés y oportunidad, mostrarlo para poder razonar sobre el mismo.

En el esquema N° 1 podemos apreciar en forma sintetizada lo que comunmente se conoce como el ciclo de agua.

ESQUEMA N° 1 CICLO DEL AGUA



Se puede comenzar por las precipitaciones de lluvias, que aportan las aguas al estado líquido. Las mismas pueden ser interceptadas por la vegetación o caer sobre los esguerrimientos de agua superficiales o los espejos de agua - encauzados (cañadas, arroyos, ríos). Una parte del agua caída, se infiltra rá en el suelo y circulará por su red de macroporos gracias a las fuerzas - gravitacionales, mientras que otra parte, será retenida por la matriz edáfi ca, quedando como agua de almacenaje disponible para las plantas o como agua fuertemente retenida. Una vez que el agua forma parte del suelo, esta puede seguir varios caminos: a) ser absorbida y evapotranspirada por la fitomasa, b) evaporada directamente a la atmósfera. Una vez en la atmósfera como con secuencia de los fenómenos de condensación y precipitación se cierra el ciclo.

El funcionamiento de todo este ciclo hidrológico, se hace posible gracias al sol, que suministra la energía necesaria para todos los principales procesos.

Cabe señalar en particular, que una parte del agua de lluvia penetra en profundidad y va a alimentar las napas freáticas y acuíferos, mientras que otra parte, puede circular en forma hipodérmica, pudiendo en algunos casos salir a la superficie.

Todo el funcionamiento del ciclo hidrológico, estará condicionado por las íntimas y recíprocas relaciones que existen entre los componentes bióticos y abióticos del sistema. Así por ejemplo, cuanto mayor sea la fitomasa existente, mayor será el porcentaje de agua interceptada y menor el porcentaje que esguerrirá por la superficie. Esta situación puede revestirse, si se produce una deforestación, que disminuya el volumen de masa verde.

Por otra parte, si consideramos al suelo, sabemos que su origen y evolución se debe a la incidencia de la interacción de los factores: clima, geología, relieve, agentes bióticos y tiempo. Cualquier cambio en uno de estos factores, provocará modificaciones a nivel del suelo, que tendrá repercusiones en el funcionamiento parcial o global de todo el ciclo hidrológico.

Nos interesa conocer las leyes que rigen el funcionamiento hidrológico, para poder tener criterios sólidos en la gestión de los recursos naturales y en particular hacer un uso eficiente del recurso agua. Esto solo se podrá lograr desde una perspectiva de análisis de sistemas.

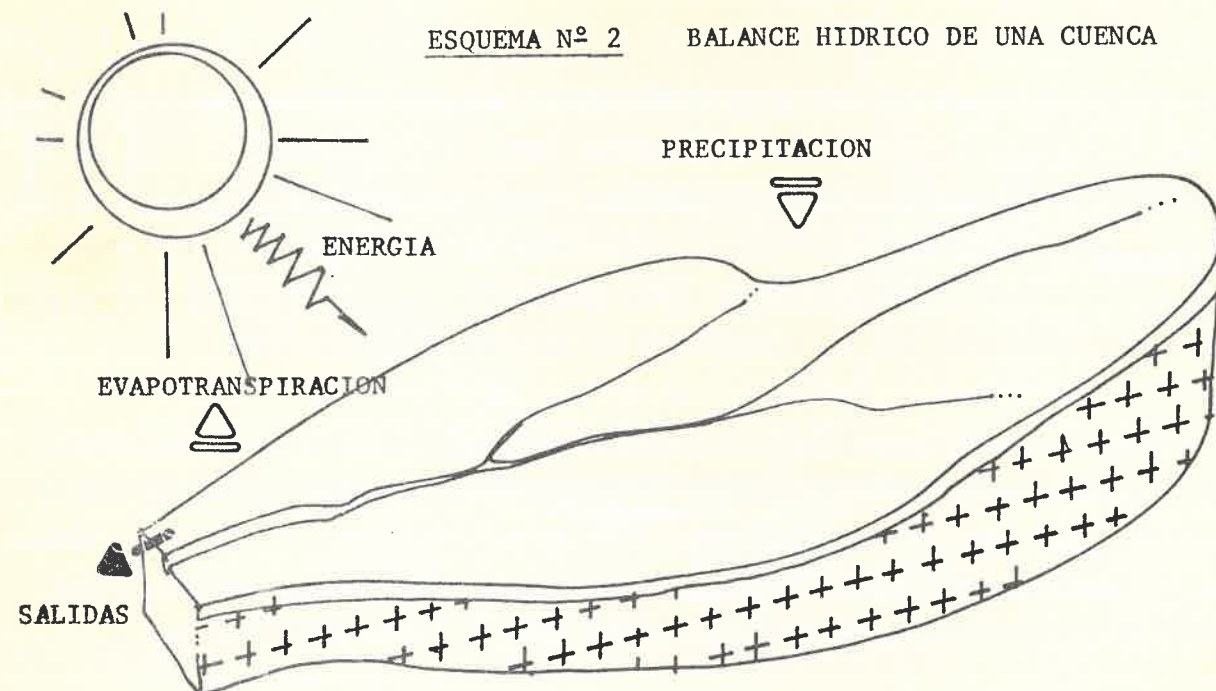
3. UN ENFOQUE ECOSISTEMICO PARA EL ESTUDIO DE LAS CUENCAS HIDROGRAFICAS

Por definición "Ecosistema" es cualquier unidad que incluye la totalidad de los organismos de un espacio determinado, que actuando en interacción entre sí y con el medio físico, donde una corriente de energía conduce a una cierta estructura trófica y a ciclos materiales, y que presenta una cierta productividad. (Puentes, 1983)

Ahora bien, una cuenca hidrográfica es una porción de paisaje delimitado por una divisoria de agua y una sección de salida en su cauce.

Uniéndolo ambas definiciones, se llega a la conclusión que la cuenca hidrográfica puede ser considerado como el ecosistema básico, que a parte de ser una unidad funcional, puede ser asimilada a un "Sistema Abierto" con entradas y salidas.

Desde esta perspectiva se puede establecer una metodología de "Balance" donde se computen las entradas y salidas del sistema (ver esquema N° 2).



En síntesis tendremos:

$$\begin{aligned} \text{GANANCIAS} &= \text{Precipitaciones Totales} + \text{Condensaciones} \\ \text{PERDIDAS} &= \text{Esgurrimiento} + \text{Drenaje} + \text{Evaporación} \end{aligned}$$

Esquematización del Ciclo Hidrológico:

$$\begin{aligned} \text{Precipitación (P)} & \quad \text{Evapotranspiración (ET)} \\ \text{Esgurrimiento (R.O)} & \quad \text{Stock (S)} \end{aligned}$$

$$P = R.O + ET \pm S$$

En el largo plazo, las variaciones de stock (S) se compensan, por lo tanto se pueden ignorar.

$$R.O = P - ET$$

3.1 Metodologías posibles en un modelo de balance

a) Lisímetros

Consiste en aislar lateralmente un volumen de suelo, al cual se le deja la superficie abierta a la lluvia y la cara inferior con un dispositivo, a fin de recoger el agua drenada.

El balance surgirá de las relaciones matemáticas siguientes:

$$\begin{aligned} \text{EVAPORACION} &= \text{PRECIPITACION} - \text{DRENAJE} \\ \text{PRECIPITACION} &= \text{VARIACION DEL STOCK} + \text{DRENAJE} + \text{EVAPORACION} \end{aligned}$$

Este procedimiento es muy utilizado en las estaciones experimentales agronómicas, con la finalidad de conocer las necesidades de agua de los distintos cultivos.

b) Parcelas de Escurrimiento

Consiste en aislar artificialmente una parte de una ladera para obtener mediciones de infiltración y escurrimiento. Para ello, se rodea la parcela con chapas, de profundidad variable, en función de las características morfológicas del tipo de suelo y en la parte inferior de la parcela se instalará un captor de escurrimiento superficial y subsuperficial.

De esta forma se puede estimar el balance hídrico, de nutrientes y pérdidas de suelo por erosión hídrica.

Con este procedimiento, podemos evaluar distintos "sistemas de producción" en relación al ciclo hidrológico y la erosión de suelos.

Este tipo de parcelas de escurrimiento también, son utilizadas, como base física experimental, cuando se emplean sistemas de simulación de lluvia artificial.

c) Cuencas

En estos casos, se realiza el balance, en el espacio comprendido por la línea divisoria de aguas (interfluvio) y una sección del cuace de salida del sistema, donde se instala la estación de medidas (caudales contenido de sedimentos en suspensión, Nutrientes, etc.).

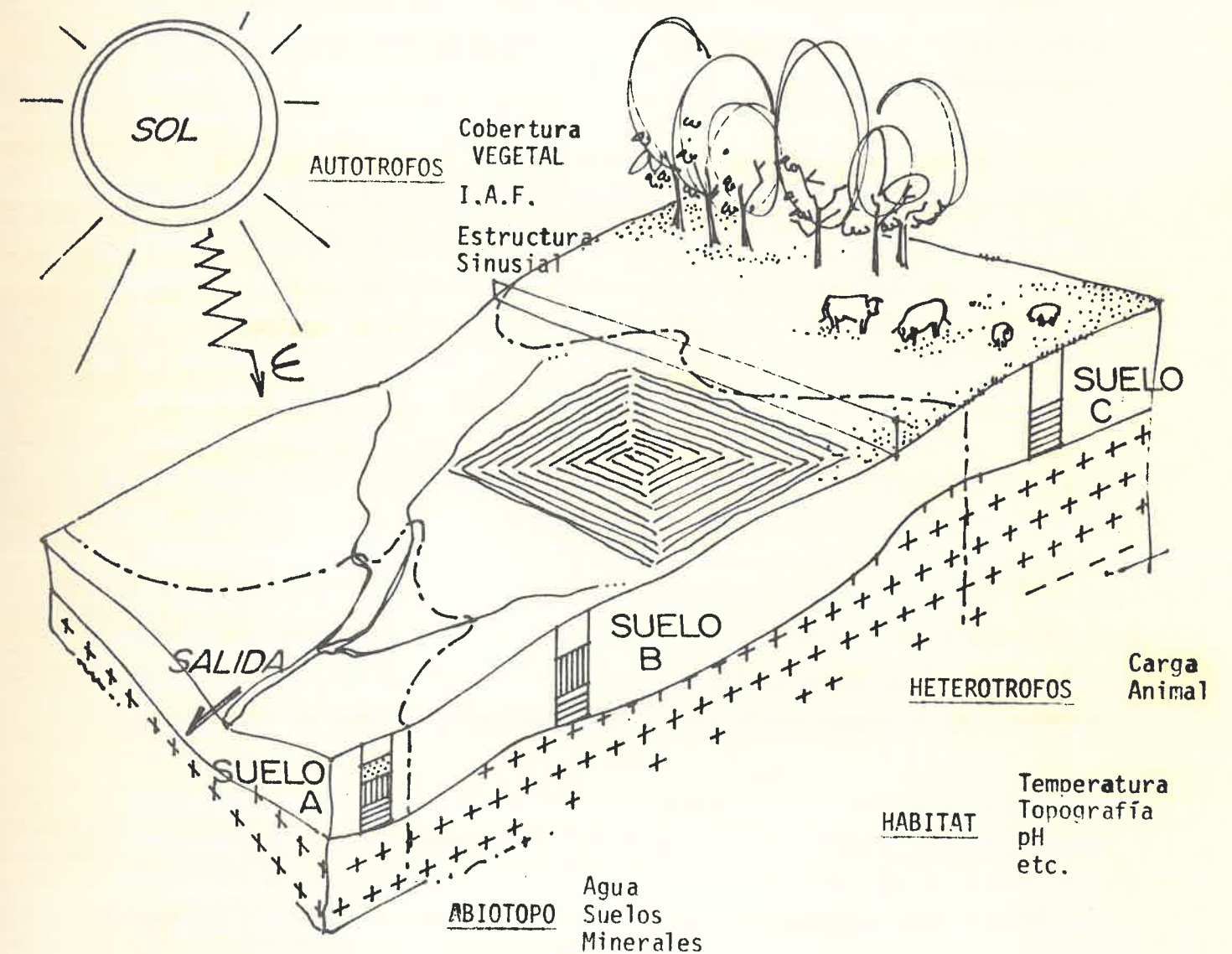
De esta forma podemos caracterizar el comportamiento hídrico de la cuenca y en particular el hidrograma unitario que consistirá en construir la curva de caudales (Q) del río o arroyo en función del tiempo (t).

De más está decir, que la investigación en cuencas permite aproximarnos a resultados de mayor grado de síntesis, dado que son el producto final de las interacciones recíprocas que se establecen entre los componentes bióticos y abióticos de la cuenca.

3.2 Enfoque Ecosistémico

En el esquema N° 3 se visualizan los principales componentes de una cuenca, desde una perspectiva ecosistémica.

ESQUEMA N° 3



En el esquema N° 3 podemos apreciar los componentes básicos de una cuenca (bióticos y abióticos) así como su arquitectura espacial que tendrá incidencia en el funcionamiento total de la misma.

Ahora bien, el hombre en sus actividades productivas va artificializando el medio natural provocando modificaciones en la arquitectura (estructura) de la cuenca que a su vez repercuten en la funcionalidad o productividad de la misma.

La investigación en cuencas, nos puede servir de enorme valor para obtener criterios científicos que orienten una gestión más racional de los recursos naturales.

4. CRITERIOS BASICOS PARA UN MANEJO INTEGRADO DE LAS CUENCAS HIDROGRAFICAS

No obstante, el Uruguay todavía no ha iniciado estudios de experimentación sobre cuencas, se pueden emplear una serie de criterios básicos, para racionalizar el uso de los recursos naturales de una cuenca.

A continuación se enumeran los principales:

- 1) La gestión integrada de las cuencas hidrográficas, debe estar orientada hacia la utilización de las tierras, de acuerdo a su capacidad de uso, principio básico de cualquier plan de conservación de suelos.
- 2) Se debe además, proteger al máximo las masas boscosas indígenas, así como propiciar la forestación de las partes altas de la cuenca, a los efectos de construir barreras biológicas, que minimicen los daños de las lluvias.
- 3) Se debe propiciar un uso racional de los pastizales naturales, adecuando las dotaciones ganaderas a la curva de oferta de forraje. Esto se verá favorecido, en la medida que el empotramiento, la instalación de abrevaderos y las reservas de forraje se hayan planificado de acuerdo a la realidad del predio.

- 4) Cuando se hace agricultura, aplicar siempre sistemas de producción conservacionistas, que en particular incluyan métodos de laboreo del suelo, que permitan una máxima eficiencia del uso del agua de lluvia.
- 5) Cuando se construyen grandes represas, siempre se debe hacer su evaluación de impacto ambiental y una vez construída se deben tomar medidas de monitoreo.
- 6) Estas grandes represas, deben propiciar el aprovechamiento múltiple del recurso agua (consumo humano, energético, riego, consumo industrial, pesca, recreación, transporte, etc.).
- 7) En la localización de los centros urbanos e industriales, se debe tener en cuenta no solo, las posibilidades de abastecimiento de agua, sino también cómo se van a evacuar las aguas cloacales y los residuos industriales.
- 8) En actividades agrícolas en su sentido amplio, se debe reducir al máximo el uso de agroquímicos, que a parte de incrementar los costos, pueden contaminar el ambiente natural y provocar graves daños ecológicos.

5. CONCLUSIONES FINALES

- 1) Para la República Oriental del Uruguay, el suelo, la pastura y el agua en particular, son recursos naturales de enorme importancia estratégica para el desarrollo de todo el país. Velar por su utilización racional es un deber de todo ciudadano de la República.
- 2) El aprovechamiento productivo de dicho recurso básico, podría incrementarse considerablemente, si el conjunto de la comunidad se organizara mejor y planificara sus actividades sobre sólidas bases de conservación en el entendido que cuanto más nos preocupemos por conservar, mejores serán las condiciones para producir más y mejor.

3) La perspectiva de lograr un Manejo Integrado de nuestras cuencas hidrográficas, presenta enormes ventajas para poder aproximarnos a un uso racional de los recursos naturales disponibles. Al ser las cuencas hídricas, verdaderos Ecosistemas, el enfoque ecosistémico para su planificación y gestión ambiental de las mismas, parece ser el único camino lógico.

4) Cada una de nuestras grandes cuencas han sufrido modificaciones más o menos importantes, como consecuencia de las actividades productivas humanas. Nuestros suelos se erosionaron, nuestra vegetación autóctona se deterioró, como consecuencia lógica el agua de lluvia, así como el agua de nuestros sistemas hídricos, comenzaron a jugar roles negativos, sobre todo el entorno ecológico, socio-económico y ambiental del país.

Para revertir esta situación, es indispensable planificar a todos los niveles: Nacional, Regional, Local y Predial, de manera tal de estructurar en forma global, mediante una coordinación en el tiempo y en el espacio, todas las actividades productivas, que tengan por objetivo incrementar la producción global del país, sin provocar daños en los recursos ni en el ambiente así como mejorar la calidad de vida de toda nuestra sociedad.

5) Para poder orientar una gestión más racional de nuestras cuencas hidrográficas debemos conocerlas mejor, tanto en su caracterización estructural como desde el punto de vista de las leyes que rigen el funcionamiento global de dichos ecosistemas. Mal podemos planificar algo que no sabemos como funciona realmente.

Desde este punto de vista, los estudios sobre cuencas, deberían comenzar lo antes posible, ya sea para caracterizar el comportamiento actual de nuestras cuencas, así como para experimentar en pequeñas cuencas, sistemas de producción "agro-silvo-pastoriles" que una vez evaluados, puedan ser expandidos en el marco de políticas de desarrollo del sector.

6) No obstante estas carencias de investigación, es posible, con los conocimientos actuales, organizar las actividades productivas, sobre bases de mucho mayor racionalidad. Para ello es necesario integrar la información disponible, analizarla y procesarla desde una perspectiva global con un enfoque necesariamente interdisciplinario, donde cada especialista aporta sus conocimientos para el bien común y se ve enriquecido por el aporte de los demás especialistas.

7) Nuestros ríos son "camino andantes" como los concebían los Mayas, llenos de riqueza que no conocemos; son además "camino andantes" que pueden servirnos para integrarnos y desarrollarnos. Que sigan siendo puros y cristalinos depende de nosotros. Que puedan utilizarse en forma integral, también depende de nosotros. Que nuestros hijos, y las generaciones futuras, también puedan beneficiarse de ellos, es nuestro deber moral.

El agua, el suelo, la vegetación y los demás recursos naturales renovables, deben ser conservados para producir más y mejor en beneficio del Hombre y la comunidad: tal ha de ser nuestro gran desafío y para ello es indispensable:

- a. Estudiar profundamente nuestra realidad
- b. Saber reconocer los errores cometidos
- c. Tener capacidad para rectificar rumbo, sobre carriles de mayor racionalidad.

6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- CAYSSIALS R. y LIESEGANG J. (1977)
"Proyecto de Cuenca Experimental" - Parámetros Hidrológicos.
Informe interno Dirección de Suelos.

- CAYSSIALS R. (1983)
"Manejo Integrado de las Cuencas Hidrográficas"
Conf. Biblioteca Nacional - Ciclo de Geopolítica. IUDEG

- CAYSSIALS R., LIESEGANG J. y PIÑEYRUA J. (1978)
"Panorama de la Erosión y Conservación de Suelos en Uruguay"
Bol.Técnico N° 4 - Dirección de Suelos

- GOMEZ OREA (1978)
"La Planificación Física"
Cuaderno de CIFCA - Madrid

- MOLINA J. (1981)
"Hacia una Agricultura Moderna"
Ed. ATENEO - Buenos Aires

- PUENTES R. (1983)
"Curso de Conservación de Suelos"
Apuntes A.I.A.

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

THE USE OF EXPERIMENTAL WATERSHEDS IN SOLVING
LAND MANAGEMENT PROBLEMS

Dr. John D. Hewlett

Montevideo-Uruguay

RESEARCH ORIENTED WORKSHOP ON EXPERIMENTAL WATERSHEDS

U.S. - Uruguay Billateral Cooperation

THE USE OF EXPERIMENTAL WATERSHEDS IN SOLVING LAND MANAGEMENT PROBLEMS

John D. Hewlett
School of Forest Resources
University of Georgia
Athens, GA 30602

ABSTRACT

The usefulness of catchment experiments in the study of man's influence on the quantity, quality and timing of water flowing from the land is still questioned, despite defense of the method by those few having extended experience with the method. It should be axiomatic that hydrological research is not an end in itself but a means to solve land and water problems. In choosing methods of research, the crucial question to address is the one that most clearly identifies a managerial problem. In modern decision-theory parlance, an identified problem is one that is capable of solution. Doubt on the part of the land manager about what course to follow, or what policy to establish, should be the immediate purpose for doing problem-oriented research. In hydrology, plot, process and simulation studies may help define the problem, or help refine the hypotheses to be tested, but finally a critical experiment must be carried out at real-world scale on a drainage basin of a size appropriate to the management practice in question. The paired catchment experiment, when properly designed, conducted and analyzed, remains the strongest tool we have for settling land use questions about the water, mineral and energy balances of basins. This paper reviews the theory of the experimental basin and makes a plea for clear formulation of solvable watershed problems before choosing methods of research.

THE USE OF EXPERIMENTAL WATERSHEDS IN SOLVING LAND MANAGEMENT PROBLEMS¹

John D. Hewlett
School of Forest Resources
University of Georgia
Athens, GA 30602

INTRODUCTION

About 1680 Marriotte and Perrault conceived the idea of measuring precipitation and streamflow on the Seine river basin, and thereby showed that there was no mystery about the source of streamflow. Such measurements later became the most basic tool in hydrology. After the pioneering efforts of Engler and Burger in Switzerland (1893-1919) to explain the hydrological regime of two Emmenthal Valley catchments by observation of precipitation and streamflow, controversy intensified among meteorologists, engineers and foresters about the influence of forests on water supplies and erosion in the United States. This led in 1909 to man's first deliberate effort to change the water regime of a drainage basin, the well-known Wagon Wheel Gap experiment in Colorado (Bates and Henry 1928). Thus the whole idea of manipulating a drainage basin's natural water balance by land treatment was born. Early work with experimental catchments, particularly by the U.S. Forest Service, showed that substantial changes in the water balance and other aspects of the hydrologic cycle could be secured by changing vegetal cover and land use practices.

Hundreds of "experimental" basins were instrumented by agricultural and forestry programs during the 1930s in an effort to show the good and bad effects of land use on the hydrological cycle. For a while, the concept of experimentation with whole drainage basins had wide appeal but the analysis and synthesis of the results did not keep pace. Some of the studies were well-planned in terms of their objectives but many were not. Much criticism later came to bear upon these aimless streamflow and precipitation gauging efforts (Ackermann 1966, Renne 1967, Reynolds and Leyton 1968).

¹Paper prepared for a Workshop on Experimental Watersheds, November 7-11, 1983, Uruguay, South America.

to make no mention of the use of whole basins for experimental purposes. For example, the Outline Plan of the Third Phase (1984-89) of the International Hydrological Programme (IHP-III) comes down heavily in favor of process and impact studies, justifiably gives short shrift to "representative" basins, but suggests no further experimentation with small watersheds. In my opinion, this unfortunate outcome is the result of a misunderstanding of problem identification and the proper role of research in solving identified problems (Hewlett 1980). Again we have the confusion of ends and means; that is, firm endorsement of certain methods of research before the purposes for the research are specifically identified.

The identified managerial problem is the ultimate purpose for doing hydrological research. A logical classification of watershed gauging efforts can be made upon the purpose for the work:

Inventory efforts are primarily intended to provide routine records of the quantity, quality and timing of the water resource. The problem addressed may be simply stated as a lack of data.

Experimental efforts are primarily intended for scientific purposes, or for solution of exactly defined problems, wherein a set of clearly stated hypotheses calls for estimation of specific hydrological, meteorological and land use parameters--leading finally to new scientific knowledge or to the extension of generalized knowledge to particular local problems.

Pilot tests are primarily intended to test or demonstrate the efficacy of developed theory on a real-world scale.

Incidentally, it may be tempting to try to do all these at once, possibly with the same personnel and the same field installations, but that often fails. A major reason is that the three goals require three different mental approaches, perhaps even three different personalities. The prime criterion for good inventory is continuity and faithfulness to detail. For experimental work, logic, imagination, knowledge of the fundamentals and willingness to alter methods takes precedence over careful routine. Successful pilot testing requires exceptional management skills, wide experience and sensitivity to what will work socially, legally and

economically. Rarely do we find all these attributes in one person. Furthermore, three diverging purposes for the same field installations are difficult to work with.

Which of these three approaches best addresses any identified problem? To make one point clear at the outset, I will offer the proposition that theoretical or deductive conclusions about the tendency for land use to increase, decrease or not affect some hydrological factor on a natural drainage basin will never satisfy the watershed manager or the public until those conclusions have been demonstrated on a scale appropriate to the management problem; i.e., on a drainage basin large enough to serve as a unit of management or a source of water. Although many basic questions about hydrological processes on watersheds will never be answered by catchment experiments alone, it remains true that most of our applicable knowledge about land use effects on the hydrology of basins came from catchment experiments. The paired watershed method, as developed by Bates and Henry (1928), Wilm (1944), Kovner and Evans (1954), Hewlett et al. (1969), Hewlett (1970) and Hewlett and Pienaar (1973), is the strongest tool we have to settle real land and water use questions. Circumstantial evidence from single basin tests, plot observations, process studies and modeling efforts have helped explain results from basin experiments or have helped to formulate new hypotheses to test, but the value of hydrological research lies more in its effective application to land management than in the beauty of its explanations and hypotheses.

THE PAIRED CATCHMENT EXPERIMENT

The theory of the paired catchment experiment is basically simple but was widely questioned because for many years no treatise of the method, its limitations and advantages, was published. Bates and Henry (1928) used simple ratio comparisons between watersheds A and B, rather than the now popular regression analyses. Wilm (1944, 1949) computed the number of years necessary to establish the confidence limits around experimental estimates of changes in streamflow, but probably overestimated the length of time needed to draw useful conclusions. Wicht (1967) expanded the design in an unusually long-term experiment on a group of associated catchments with rotating treatments, the "multiple catchment experiment," but failed to perceive the importance of a calibration period. Bryan and Hewlett (1981) offer an

up-to-date example of multiple regression analysis of a paired basin experiment, incidentally disposing of the idea that long calibration periods are invariably needed to provide useful knowledge of catchment response.

In essence the paired catchment experiment is based on the simple assumption that the relation between two basins experienced in the past will continue into the future unless some change is made on one of the basins. The necessity to account for meteorological influences in an experiment, e.g., the planting of a fallow catchment to trees, requires at least two basins and two experimental periods of time. There must be a treatment basin and a control basin located adjacent to or near each other. The control basin serves as a climatic standard. The basins should be at least roughly similar in size, shape, geology, exposure and elevation, and at the start they should have been under the same land use or vegetal cover for a number of years. The two experimental periods are usually designated the calibration period and the treatment period. Throughout the experiment, the control basin is not altered by management; established trends are allowed to continue. If the response of this basin during the treatment period is changing due to slow changes in vegetal cover or climate, it is assumed that similar changes would have occurred on the treatment basin had it not been treated. Thus results are directly relative to the management practices being tested.

Some critics of catchment experimentation have hastily concluded that the time required to produce results is excessively long. They overlook the fact that the results are produced progressively from the beginning of a treatment period and that any measured treatment effects are in a scale appropriate to the nature and dimensions of the management problem. Informative results may be secured in 5 to 10 years. Furthermore, while the argument over the time and cost of catchment experiments goes on, the years slip by and no substitute appears for the demonstration of the net effects of complex land uses on the hydrology of catchments.

SELECTION OF EXPERIMENTAL BASINS

One of the main concerns in establishing an experimental set of catchments is to secure control of the basins throughout the experiment either through ownership or by legal agreement. This is often a serious limitation in densely populated countries with few public lands. A great

deal of time and money was wasted in past years because the experimenter lost control of the area in the midst of the experiment or because he hastily attempted to rewrite his objectives and testing procedures after an uncontrolled and unforeseen change occurred in land use.

Too often the researcher who plans and begins the experiment will not remain to finish it, therefore he must leave a clear record of methods and intent. Some governmental agencies have been tempted, because of the many disciplines involved in catchment research, to design and operate catchment experiments through interdepartmental committees, with no agency or project leader clearly in charge. These experiments have invariably failed to reach their objectives because of confusion about responsibilities and credits arising out of the inevitable cross-purposes between agencies. The direction and completion of a catchment experiment should be clearly and permanently assigned to a particular project leader position and both the responsibility and the credit should accrue to that position in order to insure continuity and success of the study. Stable land ownership, whether public or private, is essential. Public ownership does not always guarantee stable conditions, particularly if two or more contending agencies of government claim jurisdiction; often the contention arises because of poor goals, weak justification or inadequate support for the project.

Another major concern is the size of the experimental basins. If the basin water divides cannot be verified by drilling, and if the underlying bedrock is not clearly exposed at the point where streamflow is to be measured, the treatment basin should be at least as large as a first order basin, i.e., a basin containing at least the first order perennial stream. As long as flow is above the stream bed, we may assume that the major portion of any treatment effect is quantitatively included in measured streamflow and that subsurface leaks (underflow) or diversions elsewhere in the basin are constant, or are accounted for in the calibration relationship. Possible fallacies in this assumption are subject to test by the calibration relationship, incidentally, a test far more reliable than computing water, energy or mineral balances by some unverifiable model. The basins should also be large enough to assure the experimenter that deviations of the subsurface water divide (phreatic divide) from the surface water divide (topographic divide) will not result in interbasin subsurface transfers of water or minerals in amounts approaching the expected treatment effect.

Experience indicates that a pair of basins each about 50 to 100 ha in area is a manageable unit to meet the requirements in many areas. Some terrains, however, should be avoided. For example, in karst terrain, in flat coastal basins, or in basins formed by tilted geologic strata such as uplifted and eroded sedimentary deposits, the basin water balance is difficult if not impossible to experiment with. If these terrains are avoided in selecting an experimental pair, the uncertainties of underground transfers can be reduced by increasing basin size and by separating the control some distance from the treatment basin to eliminate the possibility that land-use change on the treatment basin will directly affect the control, thus tending to multiply the error.

Experimental basins of the order of 1,000 ha or larger will be avoided simply because it will be impractical to apply an experimental treatment uniformly over such an area. But it will be quite feasible to use such a large basin as a "pilot test" of practices shown to be effective on smaller experimental pairs or groups. There is risk in substituting the results from pilot tests for knowledge derived from experiments on controlled basins. The failure of a pilot test may suggest that something was overlooked in the earlier conclusions but it surely does not prove that the experimental results or methods were wrong. The analysis of the pilot test is more apt to be at fault because all the measurement problems are greater. In experimenting with the water balance of land areas, we gain some advantages of scale up to a certain size, perhaps in the order of 100 to 200 ha, but above that size we lose measurement control of various components of both the treatment and the hydrologic cycle.

The best experimental basins are in upland terrains with distinct surface water divides overlying folded or horizontal geologic formations which are at bottom relatively impervious to water -- basins, in short, where most of the annual hydrologic cycle can be accounted for within the regolith or weathered mantle of soil and saprolite. Fortunately, few climatic regions of the world are totally lacking in such basins.

INSTRUMENTING THE BASINS

In catchment research, by far the most important instrument is the device for measuring hourly discharge by the stream. The "uncontrolled section," i.e., gauging in the natural streambed, may serve in erosion

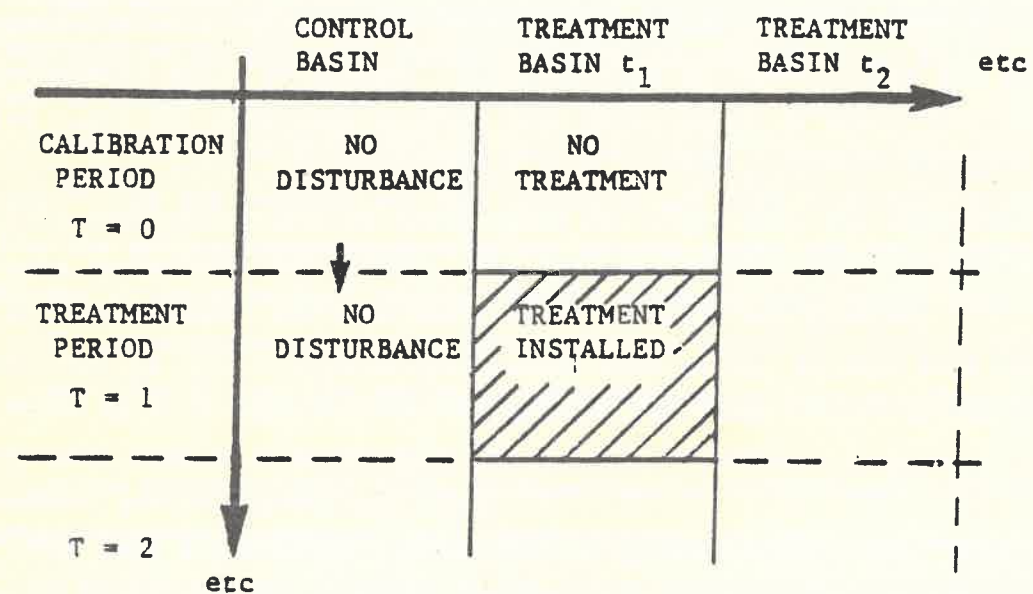
studies but will not serve in water yield experiments. The elements of the "controlled section" device are three: 1) A secure cut-off wall, preferably of concrete, anchored into solid material or to bedrock in such a manner as to eliminate the possibility of time-variable leaks beneath the wall during the experiment. 2) A simple, pretested, hydraulic design for controlling the flow of water over the cut-off wall and for providing a straight reach and a steady approach velocity to insure an accurate relation between discharge and the recorded stage of the stream. 3) An accurate, reliable (battery-operated), solidly-installed, water level recorder.

Hydraulic manuals and books on hydrometry contain almost too many designs and variations of streamgauging devices. The experimenter, even if he is not a hydraulic engineer, will be wise to study the manuals on weir design and to specify closely the precision and accuracy levels he expects of the finished device, inspecting the construction personally to see that specifications are met. He should seek the advice not only of an engineer but of someone experienced in catchment research. He should beware of the assumption that the engineer knows what the experimenter wants without detailed specifications. Both the designer and the builder are apt to pay too much attention to the above-ground, visible accessories to the cut-off wall -- the weir house, the concrete finish, or the land scaping -- and not enough to the foundations which are most critical to the experiment. The above-ground part can easily be changed or repaired but the cut-off dam cannot.

The designer should also be cautioned to avoid thin concrete walls, elaborate designs that require complex forms, and unnecessary afterthoughts, such as right-angle ponding-basin walls poured against the cut-off wall. Also, heavy weirs to intercept the "100-year-flood" are a waste of money. All such additions detract attention from thorough excavation and careful placement of concrete to insure a stable cut-off beneath the ground. The concrete should be of the best quality, poured in forms wide enough to insure a good seal and proper placement around the reinforcing steel. Metal dowling into bedrock will insure a good seal at the bottom unless the excavation reveals deep beds of gravels and stones. In the latter case, the site must be abandoned or the study design revised to allow for a larger experimental error. In short, cut-off wall construction is one engineering job where field control is more important than design.

THE CONTROL BASIN

The purpose of the control basin in the paired catchment experiment has sometimes been misconstrued to be a control on the treatment. The control basin serves as a climatic standard during the 5 to 10 years required to complete an experiment. Experience has shown that the control is a better measure of the climatic influence in the watershed experiment than any number of climatic variables measured individually. The control basin is used in regression analysis to predict what the response of the treatment basin should have been if treatment had not been imposed. A diagram illustrates the basic pair of catchments and how the experiment may be expanded in time and space.



THE ANALYSIS

During the calibration period (T=0), two similar catchments are gauged for the variables of interest, for example, streamflow (Y) and rainfall (P). A regression may be calculated after a sufficient number of observations.

$$\hat{Y}_t = b_0 + b_2 Y_c + b_4 P + \epsilon \quad (1)$$

The ϵ -term indicates that \hat{Y}_t will be predicted from Y_c and P with some error. If the error is larger than the accuracy in Y_t desired by the experimenter, then the experimental pair of basins has hidden defects, or faulty instrumentation, or insufficient observations. Neither the basins nor their vegetal cover need be identical to meet the criterion for accuracy.

During the treatment period (T=1) gauging continues. The complete array of data is analyzed by comparing the residual error from a full model that includes the treatment effect with a reduced model that does not.

The full model contains treatment effect through the dummy variable T (Gujarati 1978). When T is set equal to zero, Eq. 1 (the reduced model) results. When T is set equal to one, the full model results:

$$\hat{Y}_t = b_0 + b_1 T + (b_2 + b_3 T) Y_c + (b_4 + b_5 T) P + \epsilon \quad (2)$$

There are 6 parameters (b's) to estimate; therefore, there must be many more than 7 observations. The interaction ($Y_c * P$) may also be included in Eq. 2, but more data would be needed; the experimenter must decide whether such interactions have hydrological meaning.

The F-test of the null hypothesis, ($b_1 = b_3 = b_5 = 0$), determines whether treatment had a measurable influence on Y_t that we cannot reject as a chance event:

$$\text{Computed } F = \frac{(SS2 - SS1) / (df2 - df1)}{(EMS2)} \quad (3)$$

SS2 and SS1 are the sums of squares due to regression for the full and reduced models, and df2 and df1 are the degrees of freedom associated with the full and reduced models, respectively. EMS2 is the error mean square computed for the full model Eq. 2.

So we have two regressions on the combined data, one with T included as a variable, and one without T. If we accounted for significantly more variation in Y_t by including T, then we conclude that the treatment had an effect on streamflow from the treated basin.

SECOND STEP IN THE ANALYSIS FOR TREATMENT EFFECT

Now we wish to know how much and in what way T affected Y_t ; if enough data were available, Eq. 2 and its analysis of variance can tell us. While

reasoning cause and effect from a regression analysis is risky (can lead to error), the b's in Eq. 2 that are highly significantly different from zero may be separated from those that are marginally or non-significantly different from zero.

Suppose it turns out that the interaction effect (b_5) between T and P is non-significantly different from zero. (Note: That circumstance does not bias the F-test in Eq. 3). Before we plot the regression to analyze the response of \hat{Y}_t to a variety of values of Y_c and P, we can drop T*P and compute a new regression:

$$\hat{Y}_t = b_0 + b_1T + (b_2 + b_3T)Y_c + b_4P + \epsilon \quad (4)$$

This regression serves as another full model for Eq. 1; the parameter estimates may change, but the F test will not be seriously affected. Now we have rejected the conclusion that treatment effect varies with the magnitude of rainfall (P). We have kept the conclusion that treatment effect varies with the magnitude of streamflow on the control (Y_c).

Eq. 4 may be plotted to illustrate the changing effect of treatment over the independent variables Y_c and P. However, the plottings should not be extrapolated beyond the range experienced in the collected data; there is no estimate of error beyond that range. Furthermore, until more experiments of a similar type are carried out, there is no way to generalize the effect beyond the treatment imposed on that one experimental basin. While this seems very restrictive insofar as practical inference is concerned, it must be remembered that similar experiments are going on elsewhere, and that such experiments furnish the only secure information we have about these matters.

ADDITIONAL ANALYSIS METHODS

There are a number of ways to analyze paired and grouped catchment experiments, as well as a wide range of dependent variables to include or exclude. For example, models 1 and 2 may be written in a non-linear form and either analyzed in logarithms by linear least squares, or by non-linear least squares in which differentials, not logs, are used. In the log-linear model, we choose to regard the errors as multiplicative among the independent variables--i.e., the error term ϵ is multiplied, not added:

$$Y_t = e^{(b_0 + b_1T)} Y_c^{(b_2 + b_3T)} P^{(b_4 + b_5T)} \epsilon \quad (5)$$

The symbol e is the base for natural logs. The linear least squares solution is then performed on logs of the variables, and the b's are in log units:

$$\ln Y_t = b_0 + b_1T + b_2 \ln Y_c + b_3 \ln(Y_c * T) + b_4 \ln P + b_5 \ln(P * T) + \ln \epsilon \quad (6)$$

The error ϵ is additive in logs but multiplicative in real units of Y_t .

If the analysis is by non-linear least squares, the error is additive in real units. In that case, the model is:

$$Y_t = e^{(b_0 + b_1T)} Y_c^{(b_2 + b_3T)} P^{(b_4 + b_5T)} + \epsilon \quad (7)$$

It is obvious that this model (with the added ϵ) cannot be linearized by taking logs of the terms. The parameters must therefore be estimated by non-linear least squares.

Which of these analysis models to use is the choice of the experimenter and should be based on his hydrological knowledge and experience. When in doubt about the additive or multiplicative influence of the independent variables on the dependent variable of interest, or in doubt about the intercorrelation among the independent variables, it is perhaps best to begin with the linear models, Eq. 1 and 2. Cause and effect reasoning will be weak, but the test for treatment effect is strong.

Any number of basins and treatments can be added and analyzed by the same general procedure. However, some arrangements of pairs, treatments and intercorrelated independent variables can lead to confounded experiments. Without a calibration period, for example, the inherent differences in response of the two basins under the same rainfall will be attributed to treatment effect in a faulty analysis. Inherent differences can be large, a fact that has too often been used by inexperienced critics to dismiss the method as ineffective. The major function for the paired catchment is to identify and account for inherent differences during the calibration period.

Elapsed time after the treatment may strongly affect treatment response. If enough data are available within successive time periods, the analysis for

treatment period T may be extended by setting T = 2, T = 3, and so on, for the succeeding seasons or years. The analysis is the same but calls for more observations.

PLOTS, PROCESSES AND SIMULATION

Plot and process studies, and the simulation efforts that are most frequently built upon them, are resorted to most often because they appear cheaper and quicker than a more direct solution of a land and water problem. Because such studies are small in scale, they are easier than testing land use practices on basins. However, therein lies their weakness. Conclusions from small-scale studies cannot be extrapolated to full-scale management problems with any confidence. At best, they may lead to improved hypotheses about the effects of land use on the quantity, quality and timing of streamflow, but those hypotheses remain to be tested on basins. Plot studies particularly are suspect because it is often falsely assumed that they are "samples" of drainage basins, as, for example, when coefficients or model functions derived from plots are used to predict runoff, or changes in runoff, from basins. The variable source area concept of runoff generation, which is slowly replacing the earlier overland flow concepts attributed to Horton, makes it clear that a plot is not a sample of a basin and that results from plot studies cannot be extrapolated to predict basin behavior (water quality, quantity and timing, including erosion) with any accuracy. If we wish to predict basin behavior, we must study basins.

Insofar as the solution of real land management problems is concerned, similar reservations must be made in regard to basic studies of hydrological processes. Understanding processes is one thing, but making decisions on the land is another. For example, the addition of vapor and energy transfers to measurements of the water balance on watersheds was a genuine advance in our efforts to understand the water cycle over land areas. Explanations of the water balance became more rational and less dependent on empirical constants. But calculations of energy and vapor transfer have not become a substitute, as some seem to conclude, for the catchment experiment. Evaporation equations did not predict the astounding differences in water yield that can be produced by different plant covers on watersheds (Bosch and Hewlett 1982), although they later helped explain them. Computing vapor losses and energy transfers is not an alternative to watershed experimentation but rather must

be considered one part of the larger job of explaining how the water cycle works.

SUMMARY

This paper is a plea to formulate and clearly identify solvable watershed problems in advance of the establishment of any research program. The history of US' and other countries' watershed research is littered with the debris of poorly planned and hastily installed hydrologic networks. In fact, that debris encouraged many who were not familiar with the mainstream of catchment research to conclude that the cost was too great and the return was inadequate to justify any further expenditure on experimental basins. It is always easier to count the costs than to calculate the returns from long-term research. Impressive dollar returns from corn or poultry research are easy to demonstrate, but this is not so for benefits from watershed research. Indeed, the proof that 3 cows per hectare can safely graze a particular range, but that 6 cows per hectare will cause intolerable soil loss, is apt to be regarded at first as a negative benefit by those engaged in ranching. Nevertheless, the slow accumulation of this kind of information does eventually affect decision by both resource planner and resource user. Choice of methods in developing the required information should not be settled by academic arguments, which are apt to be based on either traditional or anti-traditional sentiments. Research strategies should be guided neither by "traditional methods" nor by "modern" methods, but rather by principles of decision theory: What research will most efficiently break the decision dilemma at hand? To that end, I append a set of steps that might well be attended to in addressing any hydrological research program.

REFERENCES

- Ackerman, W. C., 1966. Guidelines for research on hydrology of small watersheds. U. S. Dept. of Inter., Off. of Water Resources Research, Memo. 26 p.
- Anon., 1965. Inventory of representative and experimental watershed studies conducted in the United States. Special bulletin issued by Amer. Geophys. Union. for the IHD.

Bates, C. G. and J. Henry, 1928. Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado. Monthly Weather Review, Supplement No. 30, GPO, Wash., DC. 79 p.

Bosch, J. M. and J. D. Hewlett, 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. J. of Hydrol., Vol 55(3):3-27.

Bryan, B. A. and J. D. Hewlett, 1981. Effect of surface mining on storm flow and peak flow from six small basins in Eastern Kentucky. Water Resour. Res., Vol 17(2):290-299.

Clarke, R. T., 1977. A review of research on methods for extrapolation of data and scientific findings from representative and experimental basins. Tech. Docu., Intern. Hydro. Progr., UNESCO, Paris. 47 p.

Gujarati, D., 1978. Basic Econometrics. Sect. 7 & 13. McGraw-Hill, Inc., NY. 462 p.

Hewlett, J. D., 1970. Review of the catchment experiment to determine water yield. Proc. Joint FAO/USSR Intern. Symp. on For. Influ. and Watershed Management, Moscow, Aug. 1970. pp. 145-155.

Hewlett, J. D., 1980. Models in land use hydrology: The need for closing the gap between theory and practice. Tech. Rep. 13, Dept. of Water Affairs, Proc. of Workshop on the Effect of Rural Land Use and Catchment Management on Water Resources, Pretoria, S.A.F., May, 1980. pp. 4-13.

Hewlett, J. D., H. W. Lull and K. G. Reinhart, 1969. In defense of experimental watersheds. Water Resour. Res., Vol 5(1):306-316.

Hewlett, J. D. and L. Pienaar, 1973. Design and analysis of the catchment experiment. Proc. Symp. on Use of Small Watersheds in Determining Effects of Forest Land Use on Water Quality, E. H. White (ED), Univ. of Ky., Lexington, KY, May 1973. pp. 88-106.

Kovner, J. L. and T. C. Evans, 1954. A method for determining the minimum duration of watershed experiments. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol 35(4):608-612.

Linsley, R. K., 1976. Representative and experimental basins - where next? Hydrol. Sci. Bull. XXI (4):1-13.

Pereira, H. C., 1973. Land Use and Water Resources. Cambridge Univ. Press, London, 246 p.

Renne, R. R., 1967. Research guidelines to sound watershed development. J. of Irrig. and Drain. Div., ASCE, 5466(IR3):53-58.

Reynolds, E. R. C. and L. Leyton, 1967. Research data for forest policy: The purpose, methods and progress of forest hydrology. Commonwealth For. Instit., Univ. Oxford, 9th Forestry Conf. Pap. 16 p.

Riggs, H. C., 1970. The transfer value of information collected on representative basins. Symp. on Results of Research on Representative and Experimental Basins, Wellington, NZ, IASH, UNESCO. pp. 614-631.

Rodda, J. C., 1976. Facets of Hydrology: Chap 10, Basin studies. J. C. Rodda (ED). John Wiley and Sons, NY. pp. 257-297.

Toebe, C. and V. Ouryvaev, 1970. Representative and Experimental Basins: An International Guide for Research and Practice. Intern. Hydrol. Progr., UNESCO, Place de Fontenoy, Paris. 348 p.

Wicht, C. L., 1967. The validity of conclusions from South African multiple watershed experiments. Intern. Symp. on Forest Hydrology at Penn. State, PA, 1965, Pergamon Press, Oxford. pp. 749-760.

Wilm, H. G., 1944. Statistical control of hydrologic data from experimental watersheds. Trans. Amer. Geophys. Union, Part 2. pp. 618-622.

Wilm, H. G., 1949. How long should experimental watersheds be calibrated? Trans. Amer. Geophys. Union, Vol 30:272-278.

DESIGNING A WATERSHED RESEARCH PROGRAM

I. IDENTIFY THE PROBLEM FORMALLY

1. What is the PROBLEM to be solved?
 - a. Is the problem a real one, that is, definable?
 - b. Who has the problem -- a landowner, a government agency, a scientist, a resource manager, a developing country...?
 - c. Is anyone in authority to state the goals, identify the alternatives, analyze doubts and make choices among the alternatives? Or is the problem only anticipated?
 - d. If these questions cannot be answered, the problem may not be real.
2. Analysis of the PROBLEM
 - a. Is it a need to settle resources policy, to anticipate impacts, to assess past damages, or to formulate laws?
 - b. Is it a need to cut costs, or to meet specified levels of output?
 - c. Is it a simple need for information or data? Or monitoring?
 - d. Is a new device or technique needed, or new scientific understanding?
 - e. WHAT IS KNOWN ALREADY?
 - f. Is research called for, or will analysis by known methods resolve the problem?

II. IF RESEARCH IS NEEDED, FORMULATE THE RESEARCH OBJECTIVE

1. What are the specific questions to be answered?
 - a. Who is working on similar objectives now? Where?
 - b. What answers are already available? What models?
 - c. Is the objective researchable, or is it to be answered by surveys, monitoring stations or library searches?
 - If researchable, what hypotheses are to be tested (disproved)?
Consider alternate research strategies, the cost-effectiveness of each strategy.
Plots? Process studies? Modelling?
Catchment research? Pilot tests?

- If a need for data, exactly what data? For how long?
Cost and value of a datum unit; comparison among methods. Choice of methods, instruments, field stations or labs.

III. DESIGNING THE RESEARCH PROJECT

1. Analyze past experience, using libraries and consultants.
 - a. What are the useable approaches and how can they be applied?
 - b. What sources of delays and errors can be anticipated and how can they be controlled?
 - c. If experimental basins, how many treatments, time units, gaging sites, etc., are going to be needed?
2. What models are needed?
 - a. What models are already available?
 - b. Which relationships are already known?
 - c. Are they adequate? (Exactly why not?)
3. Restate the hypotheses and how they are to be tested. Outline the analysis; make allowances for "negative" findings.
4. How much time should the study take? Set termination date.
5. What personnel, funds, and field sites are needed?
6. Total the costs and benefits, and re-evaluate.
 - a. Will the results be worth the cost and effort? Will the "PROBLEM" dissolve before the answer is available?

IV. ANALYZE ALL DATA COLLECTED

1. Keep objectives clearly in mind; do not modify casually.
2. Use appropriate computational methods to reduce and analyze data.
3. Draw inferences in the light of statistical tests and the limitations they impose.
4. Review progress (and objectives) often enough to assure attainment of objectives.
5. If changes must be made, modify the work-plan formally. (Refer back to Sects. I, II and III).

V. PREPARE NECESSARY REPORTS

1. Different audiences require different reports.
2. Allow time for careful preparation of reports.
3. The final report must satisfy objectives of the investigation.

VI. PLAN FOR NEW WORK

1. Prepare new problem analyses before continuing the collection of data past termination date.
2. Do not fall into the "one-more-year-of-data" trap.

VII. TERMINATE THE WORK ON SCHEDULE

Prepared by
J. D. Hewlett, 1977

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES
Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

CARACTERISTICAS DEL CLIMA Y DE LAS CUENCAS
NATURALES QUE INFLUYEN EN LOS PROCESOS HIDROLOGICOS

Ing. Walter Corsi

Montevideo-Uruguay

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Convenio M A P - I I C A

Cooperación Bilateral Uruguay - Estados Unidos

. Ministerio de Agricultura y Pesca
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
. National Science Foundation
. Colorado State University
. Instituto Nacional de Colonización
Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA

CARACTERISTICAS DEL CLIMA Y DE LAS CUENCAS
NATURALES QUE INFLUYEN EN LOS PROCESOS HIDROLOGICOS

Walter Corsi

Jefe Proyecto Clima CIAAB
M.S. Climatología Agrícola

Convenio General de Cooperación Técnica sobre Planificación
y Manejo de Recursos Hidráulicos en América Latina y el
Caribe entre la Universidad del Estado de Colorado y el
Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
IICA.

Montevideo-Uruguay

RESUMEN.

Los procesos hidrológicos abarcan el movimiento del agua en la tierra, especialmente el efecto de la precipitación y la evaporación sobre la ocurrencia y carácter del agua en el suelo, en las corrientes superficiales o en los depósitos de agua. Todos los elementos del clima afectan los diferentes procesos hidrológicos. Sin embargo en el presente trabajo se pondrá énfasis en la precipitación, en la evaporación y en los restantes componentes del balance hídrico: evapotranspiración, deficiencia y exceso de agua, utilización y recarga de agua y el suelo como reservorio de agua para la producción agropecuaria.

El Uruguay está situada en la parte oriental de América del Sur entre los paralelos 30° y 35° de latitud sur. Su proximidad al mar y el hecho de estar ubicado en una región de la tierra con gran predominio de masas de agua, hace que las condiciones ambientales sean menos severas que a igual latitud en el Hemisferio Norte. Predominan en la región sistemas de altas presiones características de regiones subtropicales. Hay una gran proporción de días claros por la presencia de masas de aire estable y circulación de tipo descendente. La dirección predominante de las masas de aire que cruzan el territorio es suroeste-noreste. El encuentro de las masas de aire frío y seco del suroeste y las masas de aire cálido y húmedo del noreste causan la mayor parte de las precipitaciones y los cambios aperiódicos de la temperatura.

El total de lluvia anual promedio es de 1300 mm en la Región Central Norte y 1000 mm en la Región Central y en la Región Sur. En verano los valores para dichas regiones son 350 y 200 mm respectivamente. La distribución mensual de las lluvias muestra un incremento relativo de las mismas en los meses de otoño y primavera, en un padrón de lluvias que promedia los 100 mm mensuales. Hay una gran variabilidad en la lluvia mensual que ocasionan la ocurrencia de deficiencias y excesos de lluvia en cualquier época del año. Las lluvias más altas mensuales y en 24 horas se producen en abril en la mayor parte del país. El máximo diario fue de 267 mm y el máximo mensual de 736 mm y se registraron en el norte del país.

El total de la evaporación anual es de 1900 mm en el litoral del Río Uruguay y disminuye progresivamente hacia el este donde se registran los más bajos valores en Treinta y Tres con 1300 mm anuales. La evaporación mensual muestra una tendencia también decreciente de oeste a este. La evaporación en los meses de verano está comprendida entre 700 mm en el oeste y 500 mm en el este. El mes de menor evaporación es junio con 40 a 60 mm.

Se utilizó el balance hídrico como medio para determinar el efecto del factor agua en la producción agropecuaria. Se puso énfasis en lo que tiene que ver con la disponibilidad de agua y con las condiciones de stress tanto por deficiencia como por exceso de agua. Se realizaron estimaciones de evapotranspiración potencial y se consideró el suelo como reserva para suministro de agua en los períodos de deficiencia de lluvia. En el período 1965-1970 se integró una red de estaciones para estimaciones precisas basadas en el tanque de evaporación tipo A y en el método de Penman. La red estaba formada por nueve localizaciones distribuidas en forma uniforme en el país. Se realizaron determinaciones periódicas de contenido de agua en el suelo en la zona de exploración por las raíces de las pasturas naturales en las principales asociaciones de suelos del país. para conocer su variación en el tiempo y el desarrollo de modelos de predicción de contenido de agua en el suelo, basados en datos agroclimáticos.

Se realizaron mapas de capacidad de almacenaje de agua en el suelo, basados en la caracterización físico hídrica del suelo a partir de estudios realizados en 1963 (CIDE) y 1979 (MAP-DSF) con la finalidad de determinar la capacidad del suelo para almacenar agua. Se agruparon seis capacidades de almacenaje de agua comprendidas entre 50 y 250 mm de agua disponible. El 20% del país presenta suelos muy superficiales. El 10% de los suelos tiene problemas de drenaje. El resto del país presenta suelos con mediana y alta capacidad de almacenaje de agua.

Los valores más altos de evapotranspiración potencial anual están en el noroeste con 1000 mm y los más bajos en el sureste con 800 mm.

En diciembre, enero y febrero se presentan deficiencias de agua comprendidas

entre 40 mm en la Región Central Norte y 70 mm en la Región Sureste. Los mayores excesos de agua están en el Noreste con más de 300 mm anuales y los menores en el suroeste con menos de 200 mm anuales.

CARACTERISTICAS DEL CLIMA Y DE LAS CUENCAS NATURALES QUE INFLUYEN
EN LOS PROCESOS HIDROLOGICOS EN URUGUAY

por
Walter Corsi
Jefe de Proyecto Climatología Agrícola
Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger

1. INTRODUCCION

El estudio de los procesos hidrológicos ha sido objeto de atención desde tiempos primitivos ya que en áreas reducidas el hombre ha encontrado equilibrio entre sus necesidades de agua y la disponibilidad. Aun en esas áreas, a medida que ocurren transformaciones sociales y tecnológicas, se generan nuevos requerimientos y el recurso se vuelve escaso. Existen vastas áreas donde se producen deficiencias y excesos de agua. En todos los casos es necesario desarrollar tecnologías para cuantificar los elementos del ciclo hidrológico en forma precisa para su mejor utilización en trabajos de planificación. La agricultura, la generación hidroeléctrica, el desarrollo urbano y rural, y la navegación son actividades del hombre donde la incidencia del factor agua es decisiva; el desarrollo de estas actividades va a estar condicionado entre otros factores, por las características del clima por su acción en la oferta-demanda de agua y por las características de las cuencas por su capacidad para retener agua en el perfil del suelo. Aunque el agua del suelo tiene especial interés en agricultura, su incidencia se extiende al resto de las actividades dependientes del recurso agua.

El rendimiento hidrológico de una cuenca puede ser visto como el resultado integrado de los regímenes de energía e hídrico actuando sobre el suelo en que se desarrolla la vegetación y los demás factores bióticos asociados a dicha vegetación.

El propósito de este trabajo es mostrar la caracterización del clima y de la retención de agua en el suelo en las cuencas naturales realizada con los datos disponibles a comienzos de la década del 60 y de algunas acciones y trabajos llevados a cabo desde entonces que permiten tener mejores estimadores de la evaporación y de la capacidad del suelo para almacenar agua.

2. ASPECTOS CLIMATICOS BASICOS

La latitud de Uruguay, su posición en una zona con gran predominancia de masas de agua y su relieve con reducidas áreas con altitudes mayores a los 300 metros Fig. 1 determinan mucho sus condiciones climáticas. La región que comprende Uruguay está influenciada por la acción del anticiclón semipermanente del Océano Atlántico que aporta aire cálido y húmedo y por el anticiclón del Océano Pacífico que aporta aire frío y seco. Entre ambas masas se establece el frente subtropical que es causa de gran parte de las precipitaciones y de los cambios aperiódicos de la temperatura. Esta situación si bien ocurre durante todo el año es más frecuente en verano, siendo la dirección prevalente de las masas de aire que cruzan el territorio nacional suroeste - noreste. Hay predominancia de circulación de tipo anticiclónico que se caracteriza por la presencia de aire estable y descendente con baja nubosidad.

Radiación Solar

Aparte de determinaciones puntuales de radiación solar realizadas en Montevideo y en La Estanzuela no hay una red que permita tener conocimiento de la distribución de la Radiación Solar en el país. Sin embargo este aspecto pudo ser clarificado a través de la red de determinaciones de heliofanía y de la relación entre heliofanía y radiación solar total hallada en la Estanzuela $y = 0,21 + 0,56 x$ (Corsi 1980).

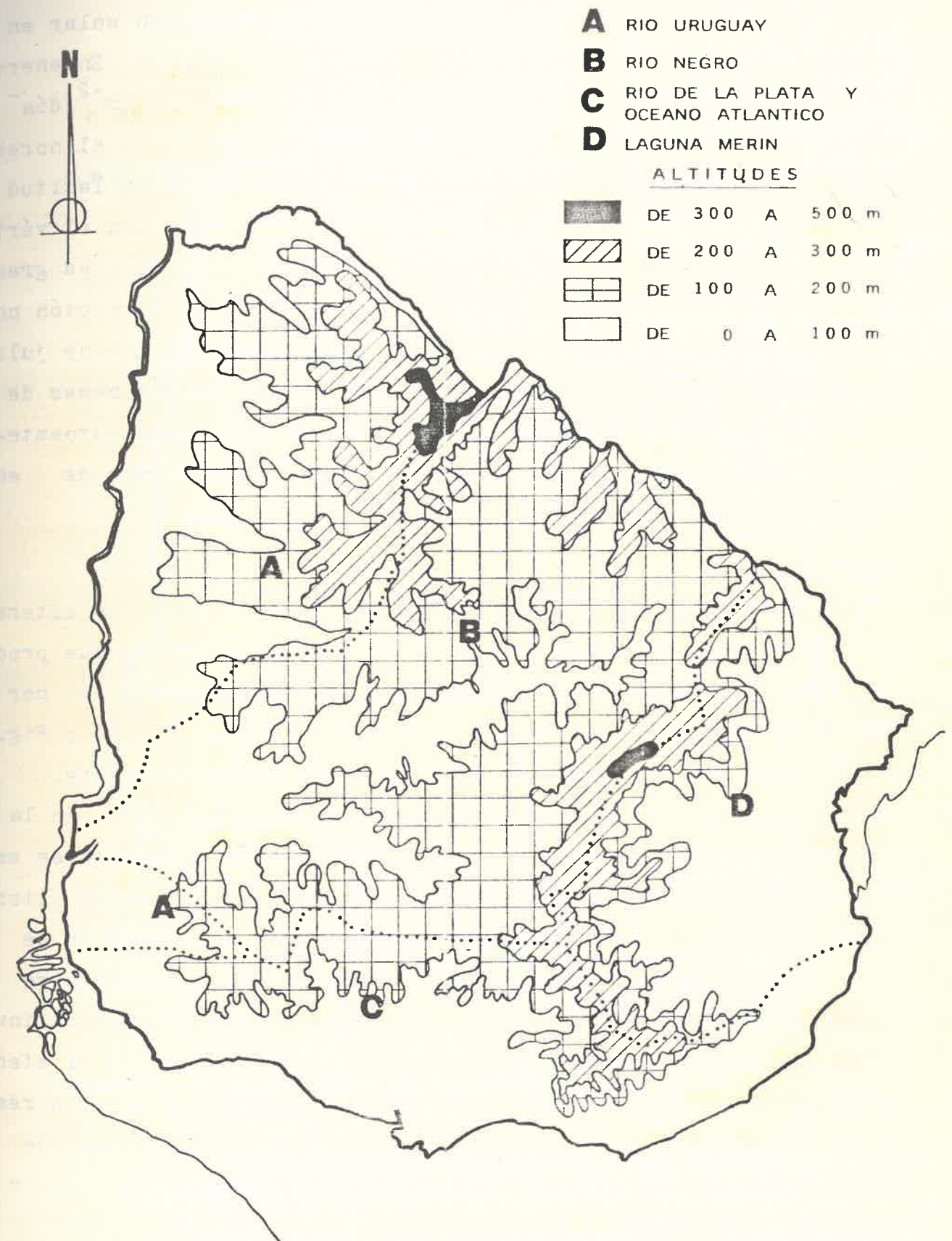


FIGURA 1 : PRINCIPALES CUENCAS HIDROGRAFICAS Y ALTITUDES DE URUGUAY

Mapas mostrando la distribución media de la radiación solar en los meses de enero y julio se muestran en las Fig. 2 y 3. En enero la radiación solar promedio recibida excede las $600 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en las regiones central sur y suroeste disminuyendo hacia el noreste debido a la nubosidad. En julio se ve el efecto de la latitud con valores promedios que exceden las $230 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en el vértice noroeste disminuyendo hacia el sur y sureste. Los mayores gradientes de radiación solar se presentan en invierno en dirección norte-sur con una diferencia de $38 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para el mes de julio - entre Bella Union y Punta del Este. En cambio en los meses de verano los mayores gradientes se presentan en dirección suroeste-nordeste con una diferencia de $45 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para el mes de enero entre Estanzuela y Treinta y Tres.

Temperatura

La normalidad de la temperatura en su ciclo anual es alterada por los pasajes de masas de aire frío y de aire cálido que producen cambios bruscos en la temperatura, que son de interés por su efecto en la producción vegetal y animal. En las Fig. 4 y Fig. 5 se muestran las isotermas de julio y enero respectivamente. Las temperaturas de mediados de verano exceden los 22°C en la mayor parte del territorio nacional. El rango de temperaturas es máximo en la región central oeste con 14°C y mínimo en el litoral sureste con menos de 11°C . El período libre de heladas es de 340 días en el noreste, alrededor de 250 días en el centro y algo más de 300 días en el litoral sur. Las temperaturas mínimas de invierno no son extremadamente bajas como puede esperarse por el efecto marítimo en el sur del país y el efecto subtropical en el noreste. Estudio realizado para La Estanzuela con una serie de más de 50 años mostró que el período medio libre de heladas está comprendido entre el 2 de agosto y el 25 de junio.

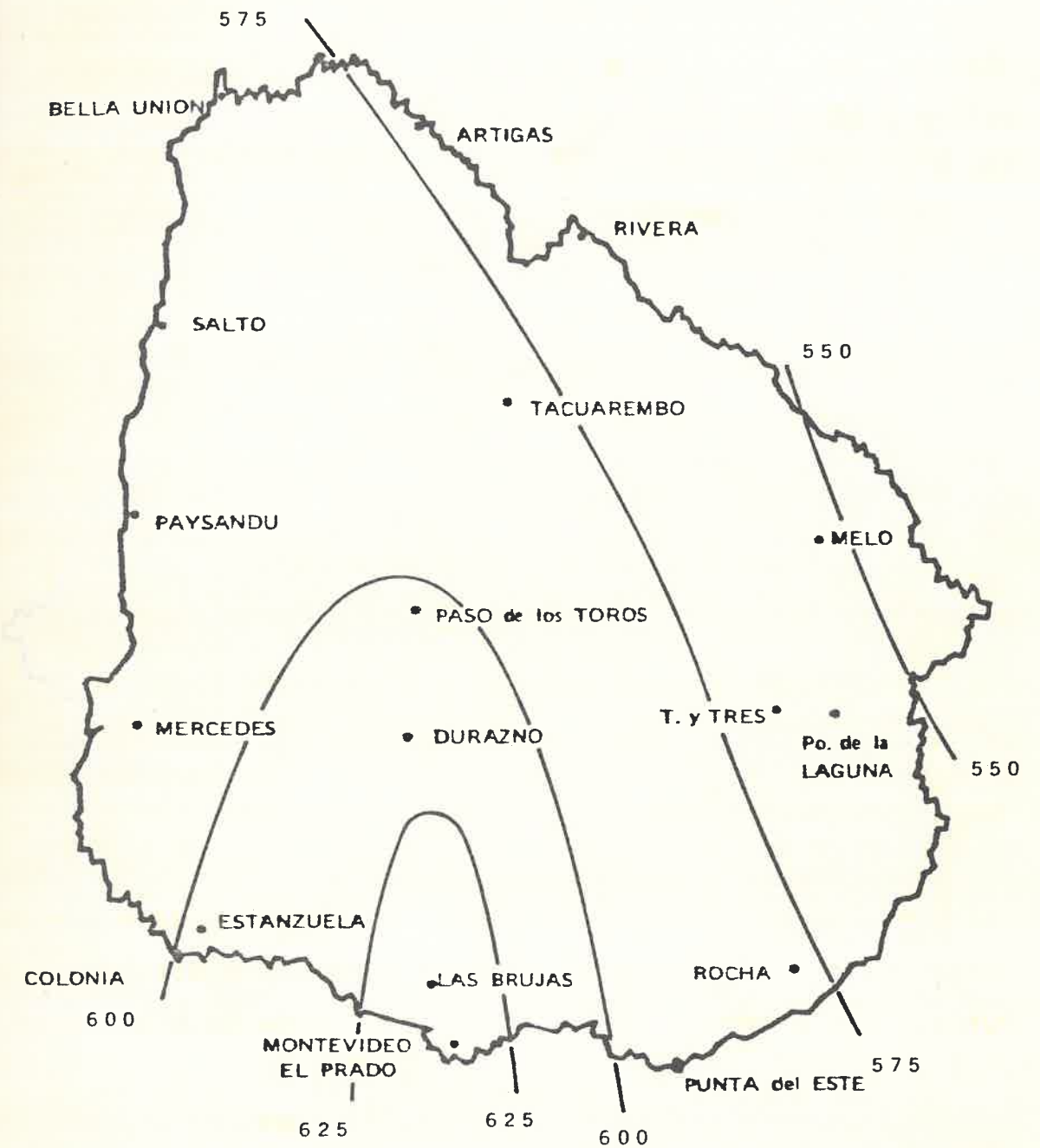


FIGURA 2 : RADIACION SOLAR TOTAL PROMEDIO ENERO
($\text{cal. cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRICOLAS ALBERTO BOERGER
PROYECTO CLIMA
W. CORSI

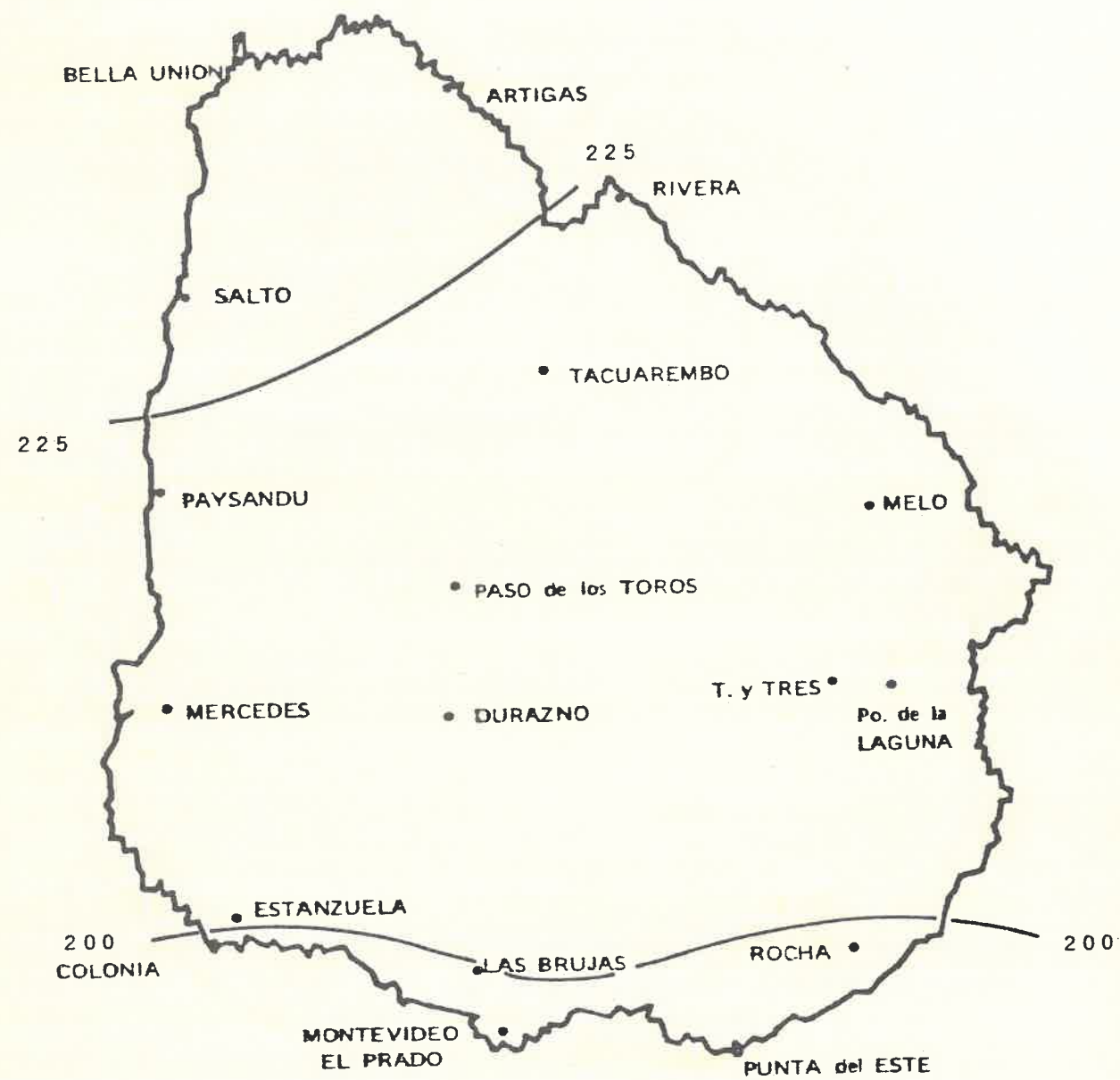


FIGURA 3 : RADIACION SOLAR TOTAL PROMEDIO DE JULIO
 (cal. cm⁻² dfa⁻¹)

CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRICOLAS ALBERTO BOERGER
 PROYECTO CLIMA

W. CORSI

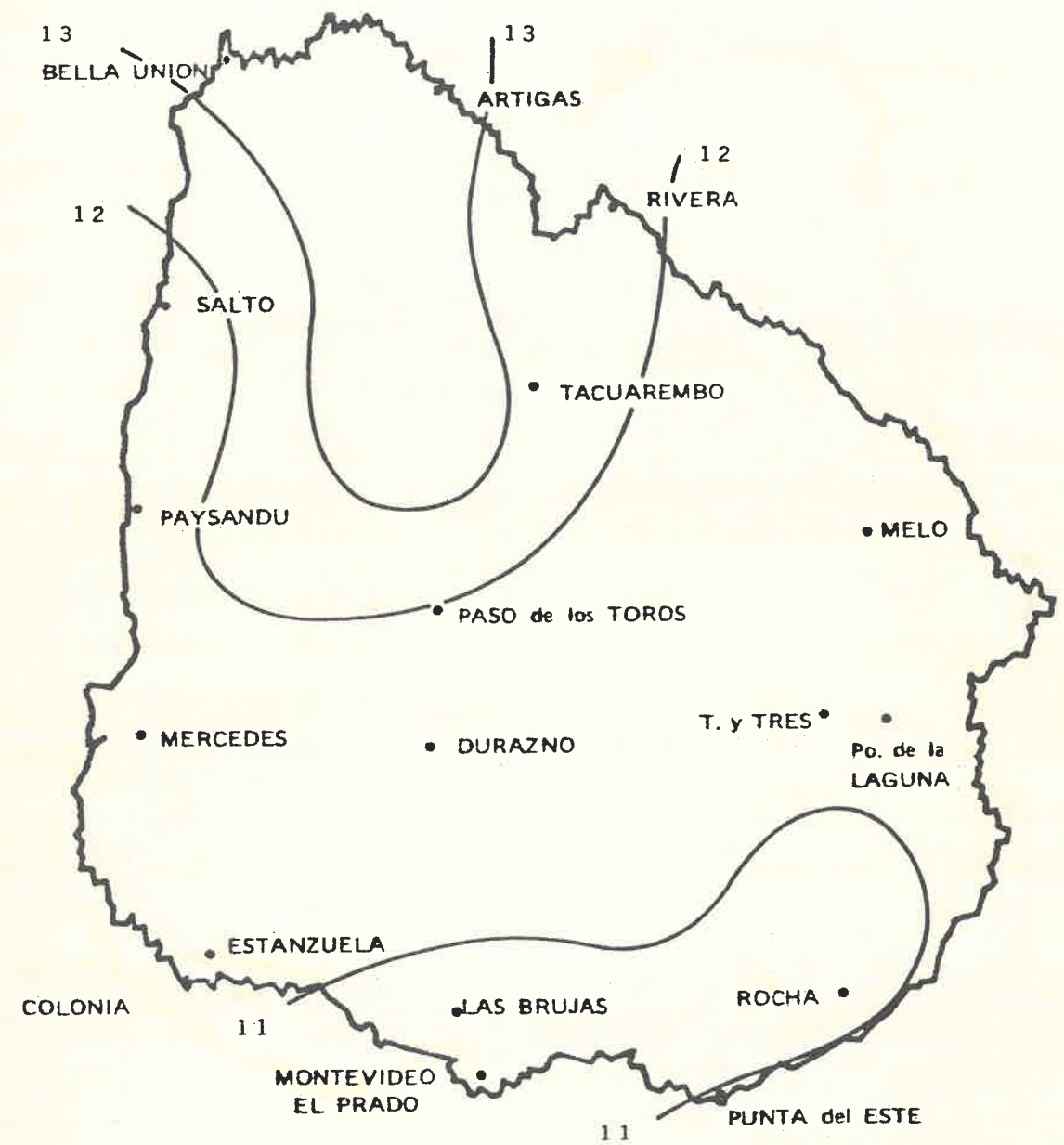


FIGURA 4 : TEMPERATURA PROMEDIO DE JULIO (°C)
 DIRECCION NACIONAL DE METEOROLOGIA



FIGURA 5 : TEMPERATURA PROMEDIO DE ENERO (°C)
DIRECCION NACIONAL DE METEOROLOGIA

Para Bella Unión con una serie de 12 años, el período medio libre de heladas estuvo comprendido entre el 21 de junio y el 29 de julio.

Precipitación

Parámetros de lluvia como promedios mensuales, estacionales o anuales sólo muestran una característica muy general de su relación con la hidrología de cuencas. Sin embargo se hará una breve descripción a los efectos de mostrar su distribución en el país. El carácter dominante de las precipitaciones en Uruguay es su variabilidad mensual, estacional y anual.

La mayoría de las precipitaciones es el resultado de la actividad frontal entre las masas de aire inestable, húmedo y cálido provenientes del norte y noreste y las masas de aire estable, frío y seco, provenientes del sur y suroeste. Esta actividad es mayor en el período más cálido del año donde también se registran las tormentas de más intensidad. La rugosidad de la topografía no contribuye en forma significativa al incremento de las precipitaciones.

La precipitación promedio anual en la Región Central Norte es de más de 1300mm disminuyendo hacia el sur donde se registran de 900 a 1000mm Fig. 6. Esta disminución de las precipitaciones hacia el sur se mantiene en los diferentes meses del año.

La distribución mensual de las precipitaciones muestra mayores valores en los meses de otoño y primavera dentro de un padrón de valores relativamente semejantes a través del año, con promedios de 120mm en el norte, 100mm en el centro y 90mm en el sur. Fig. 7 y 8.

El carácter dominante de las precipitaciones en Uruguay es la alta variabilidad anual y mensual.

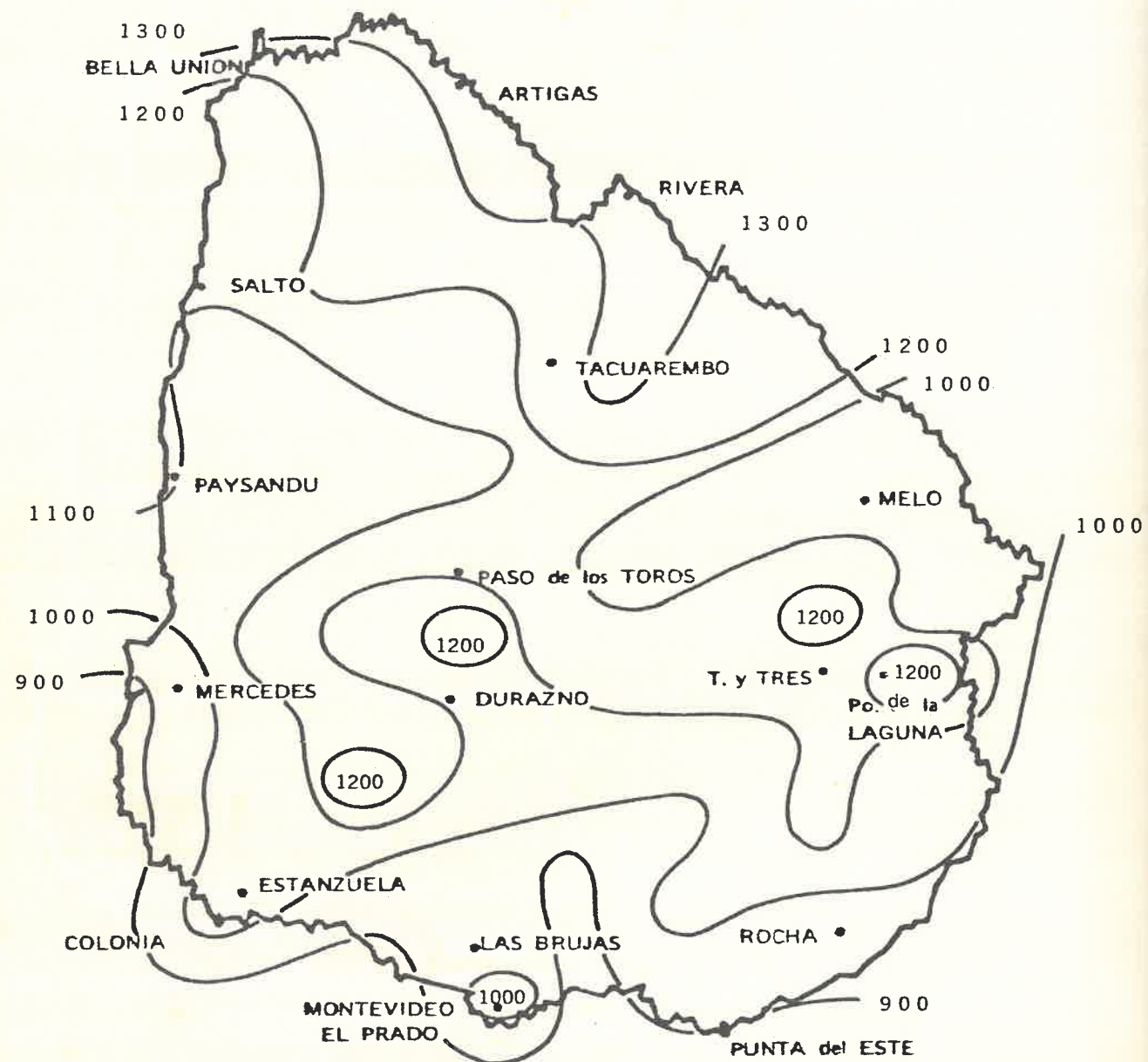


FIGURA 6 : PRECIPITACION ANUAL PROMEDIO (mm).
(DIRECCION NACIONAL de METEOROLOGIA. RED PLUVIOMETRICA BASICA)

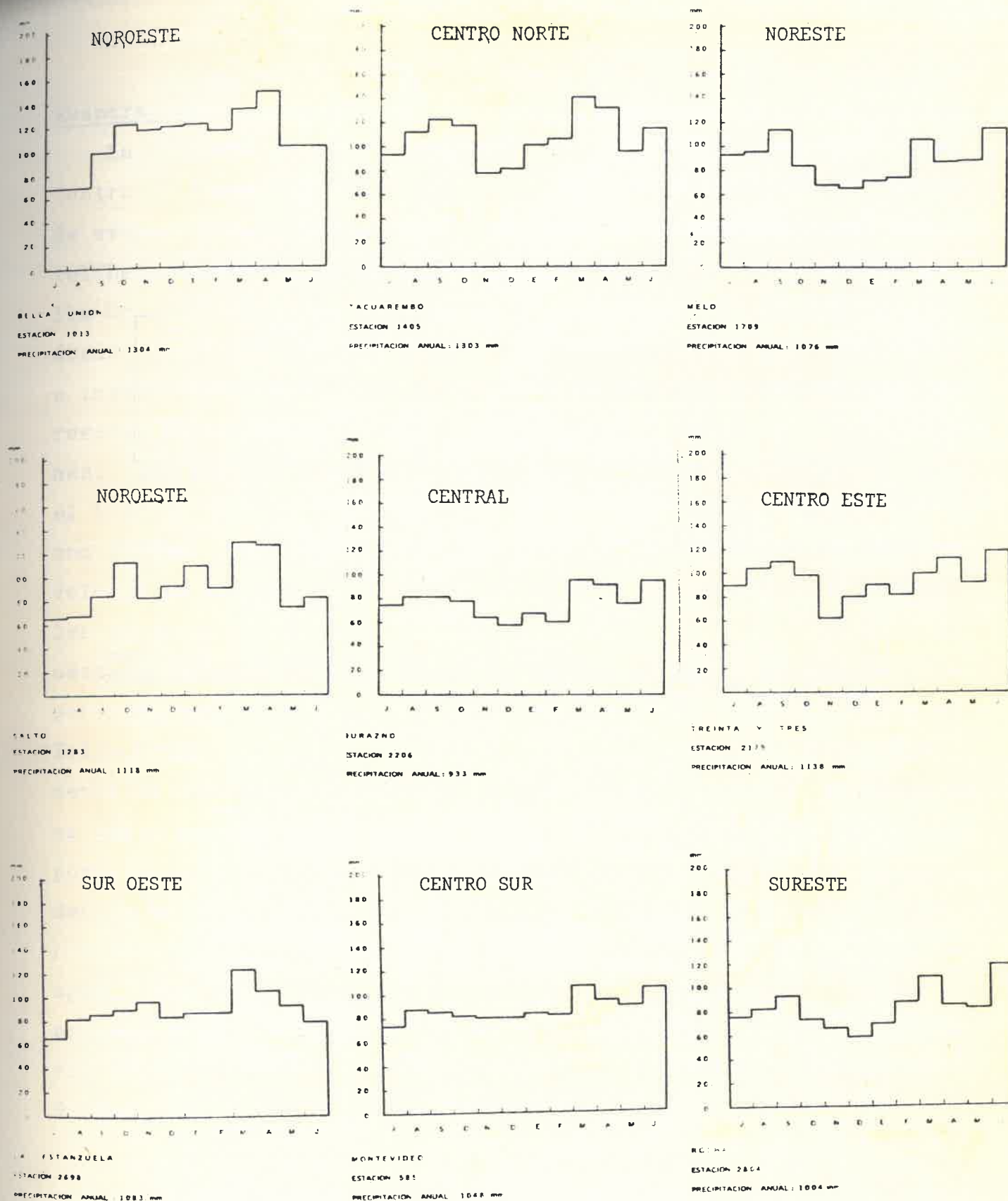
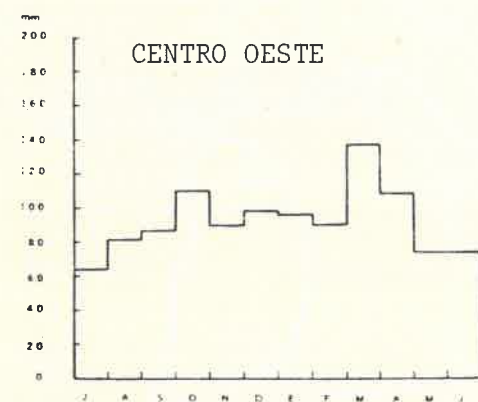
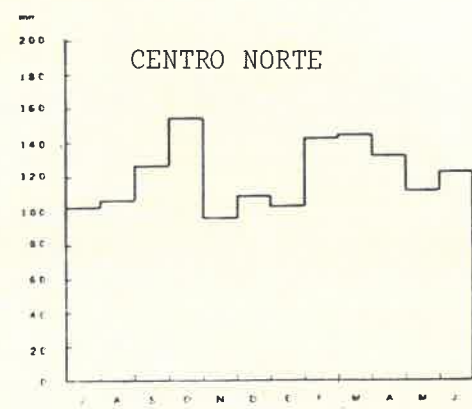


FIG. 7. Distribución mensual de las precipitaciones para estaciones elegidas de diferentes regiones de Uruguay. Red Pluviométrica Nacional. Dirección Nacional de Meteorología.



PAYSANDÚ
ESTACION 425
PRECIPITACION ANUAL 1118 mm



RIVERA
ESTACION 114
PRECIPITACION ANUAL 1430 mm

FIG. 8. Distribución mensual de las precipitaciones para estaciones elegidas de diferentes regiones de Uruguay. Red Pluviométrica Nacional. Dirección Nacional de Meteorología.

Evaporación

La evaporación se ha medido en las áreas experimentales del Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger con el tanque de evaporación tipo A a partir de 1965 en la Estación Experimental La Estanzuela, a partir de 1966 en la Unidad Experimental Bella Unión y desde comienzo de la década del 70 en el resto de las áreas experimentales del CIAAB con la participación de organismos e instituciones que colaboraron. En el Cuadro N°2 se muestra un resumen de los valores registrados en las diferentes localizaciones. Los valores mayores de evaporación anual se encuentran en el Litoral de Río Uruguay con el valor más alto en Bella Unión con 1939mm. disminuyendo hacia el este, registrándose los menores valores en Treinta y Tres con 1295mm Fig. 9. Los valores mensuales de evaporación muestran también una tendencia decreciente de oeste a este. En los meses de diciembre, enero y febrero la evaporación está comprendida entre 782mm en La Estanzuela, 708mm en Bella Unión y 503mm en Treinta y Tres y corresponden aproximadamente al 40% de la evaporación anual. El mes de menor evaporación es junio con alrededor de 50mm de promedio. El mes de mayor evaporación es diciembre. Con estos valores de evaporación hay evidencia de que en el período de mayor demanda atmosférica las precipitaciones promedio son insuficientes provocando deficiencia de agua. Por el contrario en el período de menor demanda ocurren excesos de agua. En la relación oferta-demanda el suelo juega un rol preponderante habiendo sido evaluada por el Balance Hídrico - Burgos y Corsi (1978), Corsi (1978).

CUADRO 2

Evaporación promedio mensual en mm.; determinada con tanque de evaporación Tipo A en diferentes localizaciones de Uruguay. Referencias: CIAAB, Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerger"; DNM, Dirección Nacional de Meteorología; UTU, Universidad del Trabajo del Uruguay; RAUSA, Remolacheras y Azucareras de Uruguay S.A.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	AÑO
Bella Unión 1966-1977 CIAAB	239	196	175	132	92	70	86	106	139	199	232	273	1939
Salto 1971-1978 CIAAB	219	176	146	108	75	63	63	84	118	173	205	245	1675
Paysandú 1971-1976 DNM	238	196	152	115	73	59	72	93	121	173	208	257	1757
Estanzuela 1965-1978 CIAAB	280	215	181	121	81	57	62	88	125	166	220	287	1883
Tacuarembó 1972-1976 UTU	205	171	118	100	66	51	55	65	106	153	171	224	1461
Durazno 1971-1977 UTU	217	162	135	92	59	44	51	75	105	147	182	223	1492
Las Brujas 1974-1977 CIAAB	242	175	158	123	72	62	59	83	115	167	215	273	1744
Treinta y Tres 1973-1977 CIAAB	180	128	115	80	48	47	49	65	89	131	168	195	1295
Las Flores 1972-1976 RAUSA	238	188	148	111	66	57	56	83	99	133	172	233	1584

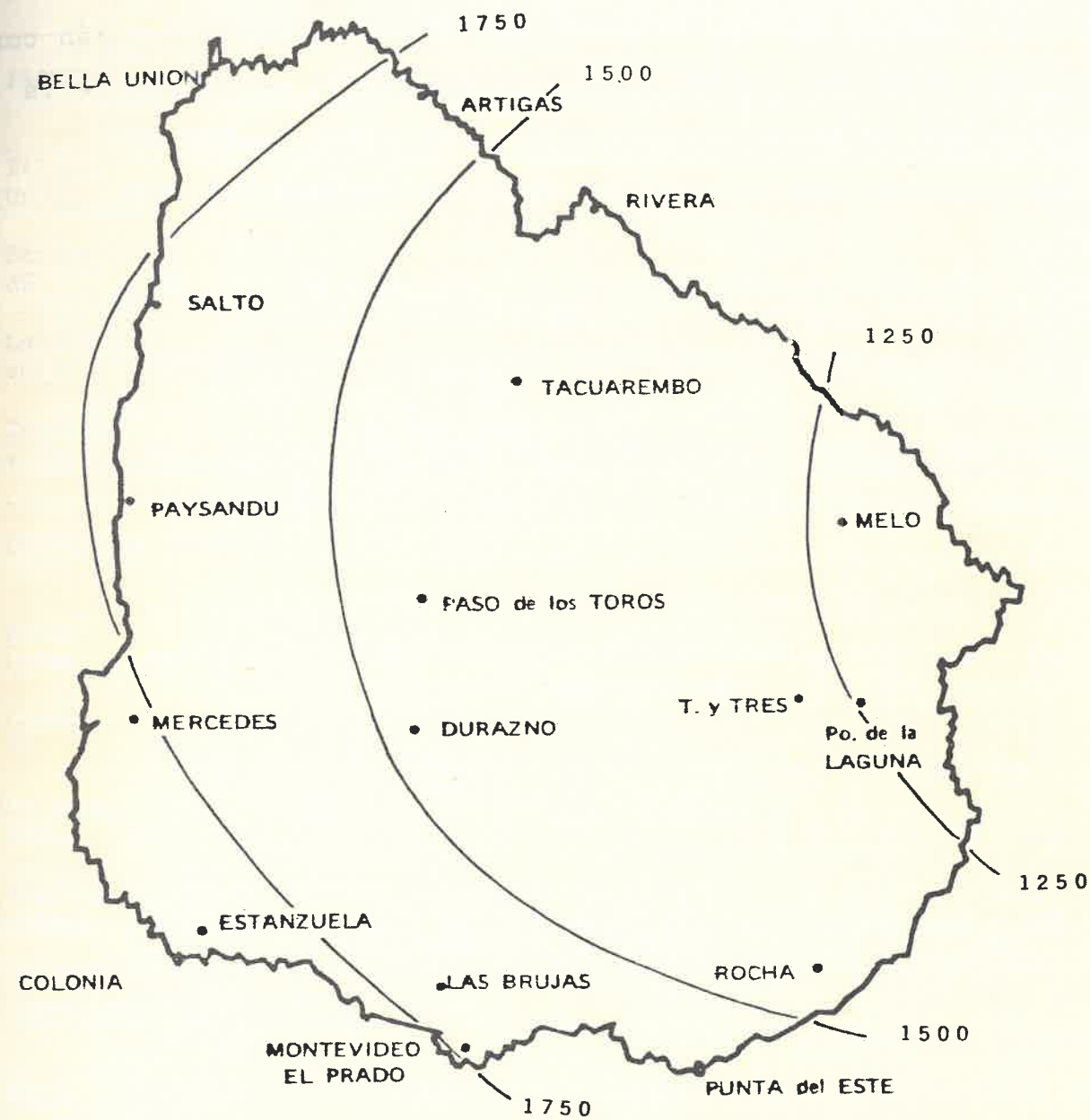


FIGURA 9 : EVAPORACION ANUAL PROMEDIO (mm) TANQUE DE EVAPORACION TIPO A.

CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRICOLAS ALBERTO BOERGER
PROYECTO CLIMA

La desviación estándar de la lluvia media mensual está comprendida entre 120 y 50mm con los mayores valores en localizaciones del norte y centro del país y los menores en el sur.

Los coeficientes de variación de la lluvia mensual están comprendidos entre 60 y 90%. Los coeficientes de variación de la lluvia anual está comprendido entre 23 y 27%. Cuadro N°1.

CUADRO 1

Valores promedio, desviación estandar y coeficiente de variación de precipitación mensual y anual para estaciones elegidas de Uruguay. (1921-1970)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	AÑO
PROMEDIO													
Bella Unión	120	114	132	146	101	100	68	68	99	122	116	119	1293
Paysandú	98	93	137	109	73	73	64	82	87	111	91	98	1111
La Estanzuela	88	87	124	106	94	79	66	83	85	91	97	84	1091
Treinta y Tres	90	81	100	113	91	119	90	105	110	98	62	80	1138
DESVIACION ESTANDAR													
Bella Unión	88	94	94	119	73	89	55	55	65	67	69	100	320
Paysandú	70	72	94	95	49	50	51	77	55	80	54	91	302
La Estanzuela	100	56	80	87	70	51	52	70	60	66	62	58	250
Treinta y Tres	61	61	58	102	85	81	58	70	76	73	56	57	280
COEFICIENTE DE VARIACION													
Bella Unión	0.73	0.82	0.71	0.82	0.72	0.89	0.81	0.81	0.66	0.55	0.59	0.84	0.25
Paysandú	0.71	0.77	0.69	0.87	0.67	0.68	0.80	0.94	0.63	0.72	0.59	0.93	0.27
La Estanzuela	1.14	0.64	0.65	0.82	0.74	0.65	0.79	0.84	0.71	0.73	0.64	0.69	0.23
Treinta y Tres	0.68	0.75	0.58	0.90	0.93	0.68	0.64	0.67	0.69	0.74	0.90	0.71	0.25

3. CUENCAS NATURALES

El relieve de Uruguay es suavemente ondulado con una baja proporción tanto de sierras como de llanuras. Estas formas son el resultado de la erosión fundamentalmente hídrica, actuando sobre los materiales geológicos originales. La estructura geológica de Uruguay es compleja presentando una gran variedad de materiales formadores de suelo. Entre estos materiales se encuentran los basamentos cristalino y basáltico, sedimentos lacustres eólicos y fluviales y areniscas. Estas formaciones que pertenecen a diferentes edades geológicas han sufrido la acción de los agentes climáticos durante un largo período de tiempo dando origen a las características propias del paisaje. Numerosas vías de drenaje superficial concentran los excesos de agua que ocurren normalmente de junio a noviembre. Los mayores valores de exceso de agua se producen en la Región Central Norte con 400mm y los menores en la Región Suroeste con 150mm (Burgos y Corsi 1978).

Las pasturas naturales cubren prácticamente la totalidad del área ganadera que tiene 9.564.000 Há. y constituyen la principal fuente de recursos forrajeros que dispone el país. Únicamente con lluvias muy por encima de los valores normales es posible obtener una buena producción en el período estival sin uso sustancial del agua almacenada en el suelo. Por el contrario en el período invernal los excesos de agua son normales (Burgos y Corsi 1978).

El agua en la zona no saturada que generalmente se le denomina humedad del suelo o más propiamente agua del suelo ha sido objeto de atención por parte de CIAAB desde 1963 cuando se inició un programa de muestreo para tener información del agua disponible en el suelo en pasturas naturales en los primeros 100cms.

Este programa que se inició en 1963 en el suroeste del país se extendió a partir de 1970, dentro del marco del Programa Regional de Investigación en Pasturas, a localizaciones que cubrieron las principales asociaciones de suelos del país, distribuidas en las diferentes cuencas hidrográficas. De esta manera se obtuvo un conjunto de valores de agua en el suelo, que actualmente se están procesando, para determinar la utilización de la reserva de agua almacenada y tener mejores estimaciones de evapotranspiración, efectividad de las precipitaciones y evaluar las pérdidas de agua como escurrimiento superficial y drenaje profundo.

Almacenaje de agua en el suelo

El agua en la hidrología de cuencas abarca aspectos que comprenden el suelo como depósito para almacenar agua para su posterior uso en producción vegetal y la utilización de los excesos de agua para otros usos. Nuestro interés está relacionado principalmente con el proceso de producción vegetal.

El proceso de transformación de energía solar en producción vegetal es ineficiente, siendo alrededor del 1 o 2% en condiciones de campo. Se utilizan grandes cantidades de energía para evaporar agua, siempre que haya agua en el suelo. Los suelos de Uruguay tienen un amplio rango de capacidades para retener agua. Suelos superficiales desarrollados sobre Basalto y Basamento Cristalino retienen de 50 a 75 mm de agua total ocupando el 32% del área nacional. Suelos desarrollados sobre areniscas y materiales sedimentarios pueden retener más de 400 mm de agua total. Fig. 10. Cuadro N° 3.

En el mes de enero en el Litoral Oeste de Uruguay puede usarse un promedio de 150 mm de agua. Cuadro N° 4. Bajo estas condiciones hay diferencia si la capacidad del suelo es de 400 mm como ocurre en suelos profundos, o es de 50 mm como ocurre en suelos superficiales. Condiciones de superficialidad ocurren también debido a problemas de drenaje como sucede en la zona 3.

El 54% de los suelos del país tienen más de 300 mm de capacidad de agua total.

Esta información se utilizó en la estimación del balance hídrico de Uruguay y la evolución del agua en el suelo en los diferentes meses del año. (Burgos y Corsi 1978).

Una nueva aproximación de las zonas de capacidad de almacenaje de agua de los suelos fue realizada por Fernández, Sacco y Corsi (1979). Está basada en descripciones de perfiles de 152 suelos dominantes de

unidades de suelos correspondientes a la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay 1979, y el trabajo de Fernández 1979, que relacionó densidad aparente, retención de agua a tensiones de $-1/3$ y -15 Bar y agua disponible en el suelo a partir de la composición granulometría y porcentaje de materia orgánica. Cuadro 5.

En las Figuras 11 a 16 se muestran los mapas con las diferentes clases de almacenaje de agua disponible en los suelos de Uruguay.

Con la información de evaporación, evapotranspiración y capacidad de almacenaje actualmente disponibles, se están desarrollando modelos de predicción de contenido de agua en el suelo adaptado a nuestras condiciones para caracterizar en forma precisa el régimen hídrico de los suelos y su aplicación a desarrollar sistemas de manejo para disminuir los riesgos de las deficiencias de agua en la producción y la utilización de los excesos de agua para aumentar las reservas.

CAPACIDAD DE ALMACENAJE

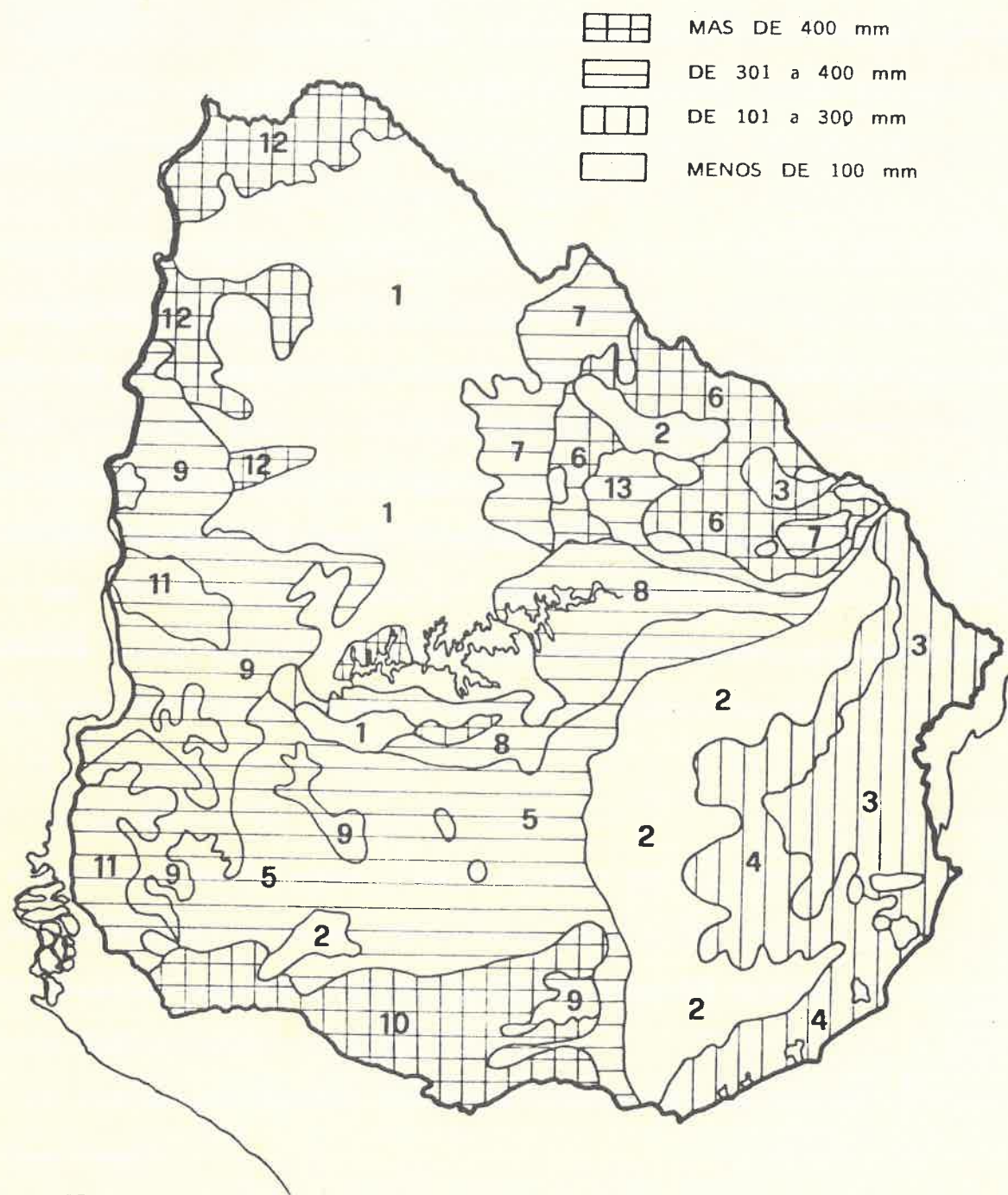


FIGURA 10: CAPACIDAD DE ALMACENAJE Y ZONAS DE USO Y MANEJO DE LOS SUELOS C.I.D.E., 1962.

JUAN J. BURGOS, WALTER CORSI

CUADRO 3

Zonas de capacidad de almacenaje de agua total en el suelo.

ZONAS DE USO Y MANEJO DE LOS SUELOS - C.I.D.E. - 1963	AREA (HÁ)	%	CAPACIDAD DE ALMACENAJE: MM
1 Suelos predominantes superficiales sobre Basaltos	3.500.000	21	75
2 Suelos predominantes superficiales sobre Cristalino	1.900.000	11,3	50
3 Suelos de texturas medias y mal drenaje	850.000	5	200
4 Suelos profundos de texturas medias con mal drenaje	1.300.000	8	250
7 Suelos profundos de textura liviana con subsuelo de permeabilidad media	570.000	3,4	300
5-8-9 Suelos profundos y medios profundos de texturas medias a algo pesadas	5.920.000	35,3	350
6-10 Suelos profundos de textura pesada, con permeabilidad lenta	2.660.000	15,7	400

CUADRO 4

Evapotranspiración Penman (1963) promedio para estaciones elegidas de Uruguay.

ESTACION	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Bella Unión 1966 - 1977	33	51	76	113	132	162	152	118	103	67	39	24
Paysandú 1970 - 1977	28	46	71	105	133	160	158	120	98	62	35	26
La Estanzuela 1965 - 1977	24	39	65	96	128	156	157	119	97	58	32	20
Treinta y Tres 1972 - 1977	22	34	57	88	112	132	135	99	85	53	29	19

CUADRO 5

ESTIMACIONES DE DENSIDAD APARENTE, RETENCION DE AGUA
A TENSIONES DE $- 1/3$ y $- 15$ BAR Y AGUA DISPONIBLE EN EL SUELO
A PARTIR DE LA COMPOSICION GRANULOMETRICA Y
PORCENTAJE DE MATERIA ORGANICA

$$D A : 3,6725 - 0,0531 h - 0,0210 a - \\ - 0,0228 b - 0,0221 c$$

$$L S : - 42,5228 - 0,0714 h + 0,4184 a + \\ + 0,7143 b + 0,9811 c$$

$$L I : - 58,1313 + 0,3718 h + 0,5682 a + \\ + 0,6414 b + 0,9755 c$$

$$A D : - 23,8725 - 0,4519 h + 0,2463 a + \\ + 0,4663 b + 0,4020 c$$

REFERENCIAS :

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| D A : densidad aparente | a : o/o arena |
| L S : límite superior de agua | b : o/o limo |
| L I : límite inferior de agua | c : o/o arcilla |
| A D : agua disponible | h : o/o materia orgánica |

C. J. FERNANDEZ

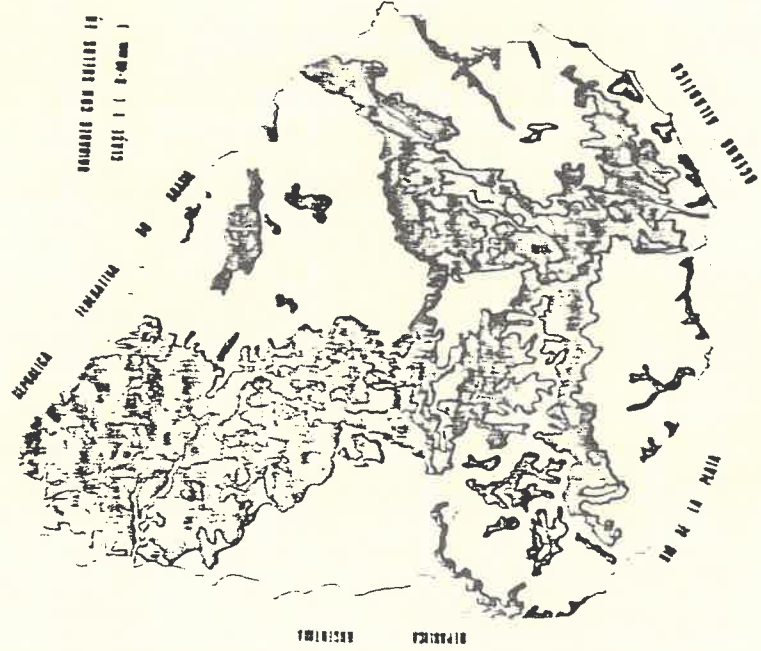


FIG. 11. Clase 1: agua disponible en el suelo entre 0 y 49 mm. Fernández, C.J.; Sacco, G. y Corsi, W.

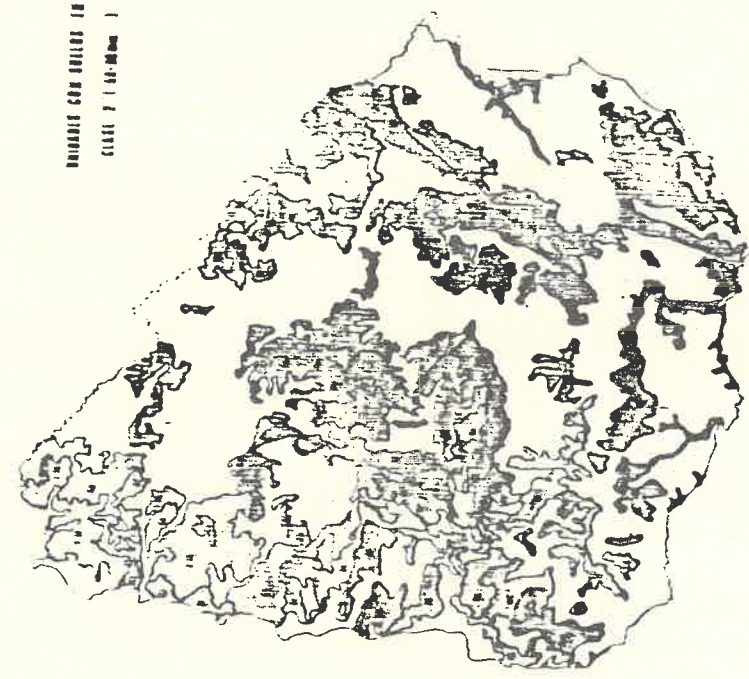


FIG. 12. Clase 2: agua disponible en el suelo entre 50 y 99 mm. Fernández, C.J.; Sacco, G. y Corsi, W.



FIG. 13. Clase 3: agua disponible en el suelo entre 100 y 149 mm. Fernández, C.J.; Sacco, G. y Corsi, W.

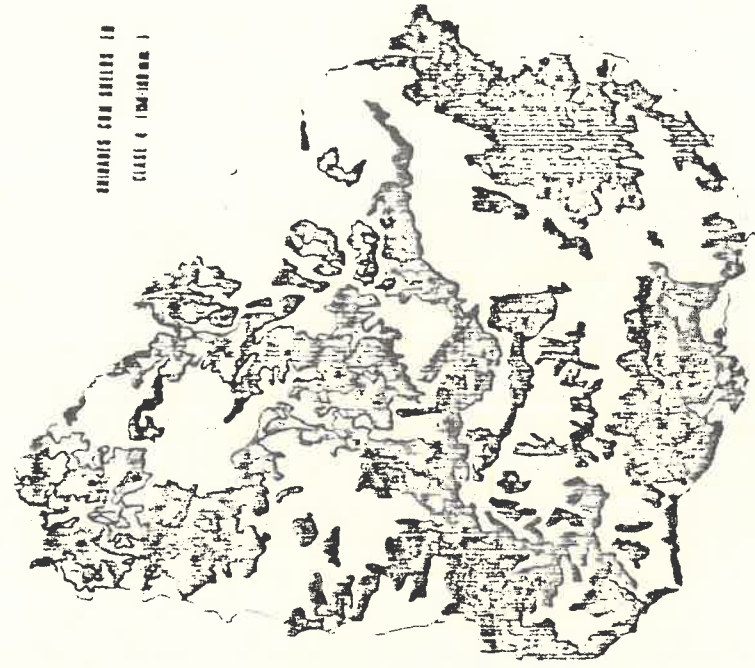


FIG. 14. Clase 4: agua disponible en el suelo entre 150 y 199 mm. Fernández, C.J.; Sacco, G. y Corsi, W.



FIG. 16. Clase 6: agua disponible en el suelo igual o mayor de 250 mm. Fernández, C.J.; Sacco, G. y Corsi, W.

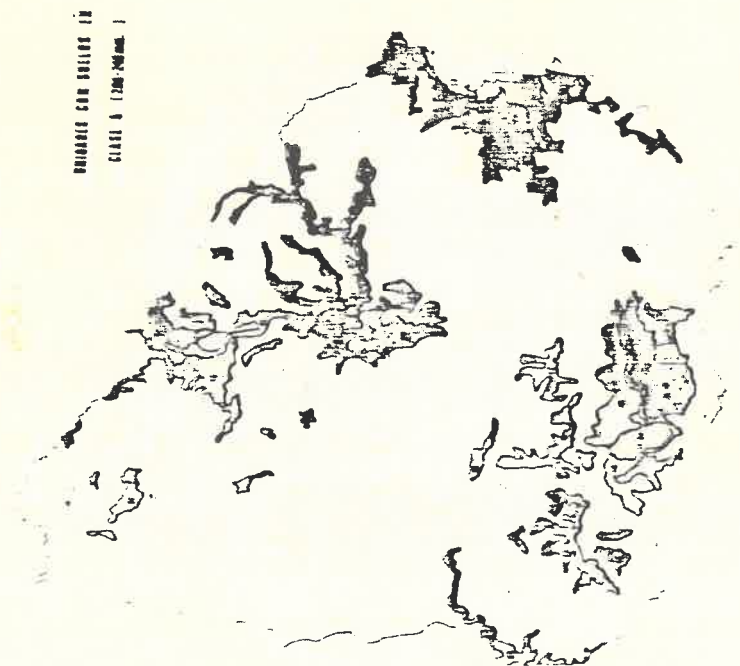


FIG. 15. Clase 5: agua disponible en el suelo entre 200 y 249 mm. Fernández, C.J.; Sacco, G. y Corsi, W.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. BURGOS, J.J. y CORSI, W. Estimación del balance de agua en la República Oriental del Uruguay. 4a. Reunión de la Comisión Asesora del Programa de Conservación de Suelos y Agua. Montevideo, IICA Zona Sur, 1978. pp. 111-124.
2. CORSI, W. Cálculo de los parámetros de lugar para estimar la radiación solar total a partir de heliofanía relativa. 3a. Reunión Técnica. Montevideo, Facultad de Agronomía, 1980. pp. 74.
3. CORSI, W. Clima. Pasturas IV. Montevideo, CIAAB, Miscelánea N° 18, 1978. pp. 255-266.
4. CORSI, W. Estimación de la radiación solar en Uruguay. MAP, CIAAB. (En preparación).
5. DIRECCION NACIONAL DE METEOROLOGIA. República Oriental del Uruguay. (Comunicación Personal).
6. FERNANDEZ, C.J. Estimaciones de densidad aparente, retención de agua a tensiones de 1/3 y 15 bar y agua disponible en el suelo a partir de la composición granulométrica y porcentaje de materia orgánica. 2a. Reunión Técnica. Montevideo, Facultad de Agronomía, 1979. pp. S 2.
7. FERNANDEZ, C.J.; SACCO, G. y CORSI, W. Capacidad de almacenamiento de agua de los suelos del Uruguay. 2a. Reunión Técnica. Montevideo, Facultad de Agronomía, 1979. pp. S 3.
8. PENMAN, H.L. Vegetation and Hidrology. Commonwealth Agricultural Bureaux, 1963. 124 p.

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

ESTADO ACTUAL DE LA CARTOGRAFIA, CARACTERIZACION Y
CLASIFICACION DE SUELOS EN EL URUGUAY

Ing. Agr. Leonel Aguirre

Montevideo-Uruguay

I. LEVANTAMIENTO DE SUELOS

1. ANTECEDENTES

Hace ya más de 40 años el geólogo Dr. Walther comenzó a realizar los primeros estudios sistemáticos de suelos que luego fueron abandonados. En la década del 50 se confecciona la primera carta de suelos del Uruguay, cuyos autores, un Grupo de Trabajo del Ministerio de Ganadería y Agricultura, la publican en 1950. Consiste en una Carta Esquemática, basada en el factor geología, y donde se separan 9 regiones que se denominan "campos".

Los primeros trabajos de suelos con conceptos netamente edafológicos son realizados por técnicos de la Facultad de Agronomía y del Ministerio de Ganadería y Agricultura, consistiendo en cartas detalladas de pocos predios dispersos en el país.

En 1962 se encarga a los Ings. Agrs. Luis de León y Oscar López Taborda dentro de los estudios de la CIDE, realizar el primer inventario de suelos del país, el que queda terminado ese mismo año, en forma de una Carta Esquemática a escala 1:3.000.000. En ella se divide al territorio en 13 zonas en las que se hacen interpretaciones de Uso y Manejo de cada una. Se usan las fotos aéreas del trimetogón, consistentes en bandas tomadas verticalmente y a cada lado bandas oblicuas. Para esta Carta se consideran factores pedogenéticos y se agrupan los suelos en Grandes Grupos, de acuerdo a la clasificación de Riecken (1959), aunque los contornos de las zonas son muy coincidentes con el mapa geológico de Caorsi y Goñi de 1957.

2. LA CARTA DE SUELOS DE LA CUENCA DE LA LAGUNA MERIN

Dentro de los trabajos que se realizaron en el marco del Convenio FAO-PNUD-CLM, se confeccionó entre 1966 y 1969 una Carta de Suelos de toda el área, 3.000.000 de hectáreas, a escala 1:200.000. La realización de esta Carta fue bajo la dirección del Dr. W.G. Sombroek de FAO, con el apoyo de personal de la Dirección de Suelos en los trabajos de campo y algunas partes del informe.

Para este levantamiento se realizó la fotointerpretación en fotos aéreas a escala 1:40.000, pasándose luego a fotoplanos controlados 1:100.000, reduciéndose posteriormente a 1:200.000.

Se tomaron muestras para analizar de unos 200 suelos y se describieron a taladro unos 2.000 perfiles, lo que hace una densidad de un suelo caracterizado cada 15.000 hás y una descripción cada 1.500 hás. Los suelos fueron analizados en el laboratorio de FAO en Pelotas (RGS-Brasil).

La leyenda agrupa las unidades de suelos de acuerdo a grandes unidades básicas geomorfológicas:

Sierras
Colinas
Lomadas
Llanuras
Bañados

Surgen así 94 unidades con numerosas fases por rocosidad, alcalinidad, salinidad y erosión.

Se realizó una interpretación de Uso y Manejo de los suelos haciéndose hincapié en los aspectos de riego, dado que en esa zona se concentra la inmensa mayoría de las áreas arrosables del país.

Los suelos fueron clasificados según el sistema de FAO, pero en las descripciones figura también la clasificación de Riecken.

3. EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS DEL URUGUAY A ESCALA 1:1.000.000

Con el objetivo fundamental de la caracterización, clasificación y cartografía de suelos se crea el Convenio de Suelos entre la Facultad de Agronomía y el Ministerio de Ganadería y Agricultura; se forma así el cuerpo técnico especializado, que hasta entonces no existía en el país.

La cobertura aérea total realizada entre 1966-67 a dos escalas 1:40.000 y 1:20.000 introduce una nueva herramienta invaluable que facilita enormemente el trabajo de relevamiento, lográndose separar en el gabinete zonas de relieve, vegetación y geología homogéneas, con una gran precisión en sus límites.

Con la experiencia que dejó la estadía en el país de varios técnicos de EE.UU., la influencia de los edafólogos de FAO que trabajaron en la Cuenca de la Laguna Merín, y los trabajos de geomorfólogos franceses e ingleses, sumado a la experiencia ya lograda por el cuerpo técnico nacional, que desde 1961 trabajaba en la confección de cartas detalladas y semidetalladas de algunas zonas, se redondea una metodología general para comenzar el relevamiento de reconocimiento de suelos de todo el país, cuya fecha de comienzo se puede situar en 1968.

La metodología propuesta consta de varias etapas, y es aproximadamente la metodología más comunmente usada en forma universal, con las modificaciones que correspondan para adaptarla a nuestro medio.

El país fue dividido en cinco zonas donde actuaron diferentes equipos de técnicos.

- A) Fotointerpretación preliminar - Se realiza en fotos aéreas a escala 1:40.000, delimitando áreas homogéneas (Unidades de Mapeo) que por su tamaño que se pudieran expresar a escala 1:100.000 de acuerdo a:
- uso actual
 - relieve (forma y energía)
 - tonos (vegetación y humedad)
 - afloramientos y tipo de drenaje (geología)

Siendo que estas características son algunos de los factores de formación del suelo, se plantea la hipótesis de que áreas homogéneas contienen suelos semejantes.

B) Trabajo de campo - Es la comprobación en el campo de esa hipótesis. Se recorre el terreno con el fin de controlar y corregir las líneas de la fotointerpretación preliminar.

Se describen los suelos en sus propiedades morfológicas, su relación con el paisaje y características asociadas:

- posición geomorfológica
- vegetación
- rocosidad
- inundaciones
- erosión

Esta descripción se hace primero en forma rápida, con el tadaladro, para definir la composición del Padrón de Suelos. Una vez individualizados los componentes, se describen en forma más detalladas en calicatas, realizándose las tomas de muestras para análisis químico, físico y mineralógico. Cuantitativamente se determina el porcentaje de cada suelo en la Unidad de Mapeo, estimándolo en base a su ocurrencia en el paisaje, o si se tienen, midéndolo en base a relevamientos detallados de la zona.

En total se realizaron alrededor de 6000 descripciones a tadaladro y se analizaron 1.100 perfiles, lo que da una densidad de una descripción cada 3.000 hás. y un suelo caracterizado cada 16.000 hás.

C) Caracterización - Las determinaciones químicas y mecánicas (textura), se hacen en todos los suelos descriptos en calicatas, para proceder a su clasificación inequívoca de acuerdo a una nueva Clasificación de Suelos que se elaboró especialmente.

Las determinaciones físicas y mineralógicas solo se hacen en situaciones de interés especial para realizar interpretaciones en uso y manejo o de génesis del suelo.

D) Fotointerpretación definitiva - Con toda la información recogida en el campo, más los suelos caracterizados y clasificados, se procede a una revisión de la fotointerpretación preliminar, corrigiendo límites y verificando la certeza o no de las hipótesis originales. Se obtienen así los límites definitivos de las Unidades de Mapeo, los suelos que las integran y en que porcentaje.

La información se pasó de las fotos a fotoplanos controlados a escala 1:50.000, y en base a estos se realizó una síntesis a escala 1:500.000, escala que se pensó originalmente que sería la de publicación final. Analizada esta Carta se concluyó que no existía un suficiente volumen de suelos caracterizados, por lo que se realizó una nueva síntesis a escala 1:1.000.000, donde sí resultaron unidades homogéneas y con una buena información de suelos de cada unidad.

En realidad los distintos equipos de trabajo, aunque adoptaron la metodología general planteada, actuaron en forma diferente. Se puede poner un límite norte-sur que divida al país en dos: los equipos que actuaron en el este, con la evidente influencia de los técnicos de FAO separaron unidades de paisaje grandes, realizando una densidad de descripciones a tadaladro y un muestreo de suelos mucho más denso y con bastante regularidad en todo el terreno: los equipos que actuaron en el oeste, con la base de los trabajos realizados por geomorfólogos extranjeros, realizaron una fotointerpretación mucho más detallada, dividiendo las unidades de paisaje en interfluvios laderas y valles, concentrando la información de suelos en cadenas o zonas pequeñas.

En el primer caso se llega a un conocimiento mejor de los sue los dominantes y asociados y sus variaciones en todas o casi todos las unidades homogéneas; en el segundo caso hay un cono cimiento menor de los suelos dominantes y asociados, pero mu- cho mayor de los accesorios y de la ubicación de todos los sue los en el paisaje y sus porcentajes relativos, pero con nece- sidad de realizar extrapolaciones a otras zonas del terreno no reconocidas, pero homogéneas por fotointerpretación.

En el primer caso el nivel de levantamiento se puede asimilar a los meso o macrocore (Neef, 1967), o land system (Christian y Steward, 1964); en el segundo caso se puede asimilar a los microcore (Neef, 1967), o land units (Christian y Steward, 1964)

Si bien el resultado no es exactamente el mismo, al sinteti- zarse en unidades a escala 1:1.000.000, éstas resultan homogé- neas en su información. Para la próxima etapa de cartas a es- cala 1:100.000, que ya se empiezan a publicar. La informa- ción actual obligará a metodologías diferentes: en el este se tendrá que determinar con mayor precisión el padrón de cada - unidad, estando éstas ya determinadas; en el oeste se tendrá - que verificar la homogeneidad del padrón de suelos en aquellas unidades donde se extrapolo la información.

E) Informe - Interpretación - Publicación - La Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000 consta de la Carta con su leyenda y de un informe separado en cuatro tomos:

- I. Clasificación de Suelos
- II. Condiciones Generales del Medio Ambiente y Factores de Formación de los Suelos
- III. Descripción de las Unidades de Suelos
- IV. Uso y Manejo de los Suelos

Hasta el momento se han publicado los Tomos I y III, siendo - inminente la publicación del Tomo II.

Esta carta divide al territorio en 99 Unidades de Mapeo, con sistentes en Asociaciones de Familias de Suelos, individuali- zados con nombres geográficos, y cuantificadas las áreas to- tales y relativas de cada Unidad.

Para cada unidad se determinan el material generador, el re- lieve, padrón de suelos, vegetación y uso actual.

En la leyenda se indican los suelos dominantes, asociados y accesorios de cada unidad. El suelo dominante es aquel que ocupa 50% o más de la unidad. Cuando ningún suelo por sí so lo llega a ocupar dicha superficie se considera un conjunto- de suelos que cumplan con dicho requerimiento.

Los suelos asociados son aquellos que ocupan entre el 10 y el 40% de la superficie de la unidad.

Los suelos accesorios ocupan menos del 10%.

En el informe figura una descripción sintetizada de varios - suelos semejantes, constituyendo un perfil modal, con algu- nos datos morfológicos, químicos y físicos y características inferidas y asociadas.

En un apéndice aparecen los perfiles representativos con la totalidad de los datos.

Aunque aún no se ha publicado el Tomo IV del informe, base pa- ra todas las interpretaciones sobre Uso y Manejo, por distin- tos motivos ya se han realizado muchas cartas interpretati- vas, parciales o totales, sobre aptitud agrícola, pastoril, fo- restal, para cultivos específicos, riesgo de erosión, erosión actual, etc.

Esta Carta sirve básicamente para programar el mejor aprovechamiento del recurso suelo a nivel nacional y regional por lo que constituye una base para el desarrollo del sector agropecuario al permitir establecer estudios sobre regionalización de rubros y sistemas apropiados de producción y de uso y manejo de los suelos que permitan una máxima productividad sin que esto implique pérdidas ni deterioro del recurso.

La Carta de Suelos suministra el conocimiento básico de la disponibilidad de tierras a ser destinadas en agricultura, ganadería, forestación, y reservas naturales; determina áreas homogéneas a tener en cuenta por la investigación agrícola para poder recoger los problemas de la producción y extender los resultados de sus trabajos. Además posibilita la evaluación de la productividad potencial de las distintas áreas con propósitos de planificación de políticas crediticias e impositivas.

4. CARTOGRAFIA DE LOS GRUPOS DE PRODUCTIVIDAD CONEAT

En este último sentido, el de políticas impositivas, se ha cumplido una etapa de gran trascendencia, que es la ejecución de la cartografía de suelos para la determinación de la capacidad productiva de la tierra.

Con la base de la misma cartografía existente en las fotos 1:40.000, se pasó ésta a fotoplanos controlados 1:50.000 y se amplió a 1:20.000. Se agruparon las unidades básicas de la carta de suelos, asociaciones de suelos, en otras unidades llamadas Grupos de Productividad CONEAT (Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra, institución encargada de la coordinación y ejecución de este proyecto) que poseen similares características de producción de carne bovina, ovina y lana.

Los Grupos de Productividad CONEAT no son estrictamente unidades cartográficas básicas de suelos, sino que constituyen áreas homogéneas, a la escala de trabajo utilizada, definidas por su capacidad productiva en los rubros ya mencionados, que se expresa por un índice relativo a la capacidad productiva media del país, a la que corresponde el índice 100. Este índice fue calculado para cada Grupo de Productividad mediante la información del Censo General Agropecuario, y con el aporte de técnicos y productores-conocedores de las posibilidades de cada zona del país.

La cartografía de los Grupos CONEAT, 188 en total, junto con la información catastral superpuesta, está archivada en 1.200 láminas a escala 1:20.000 que cubren todo el país.

5. CARTA DE RECONOCIMIENTO A ESCALA 1:100.000

Una vez terminado el relevamiento a escala 1:1.000.000 se comenzó con la Carta de Suelos a escala 1:100.000, que se publicará por departamentos, comenzándose por aquellos que tengan mayor número de productores, o que por su potencial agrícola tengan mayor peso económico.

En este momento ya se ha publicado la primera carta de los departamentos de Montevideo y Canelones.

Con esta nueva Carta se podrá dar una mayor información a nivel regional y aún predial, que permitirá:

- dar a la experimentación una sólida base en las relaciones suelo-planta-manejo, posibilitando una mayor precisión en la extensión de los resultados;
- definir la aptitud de los suelos respecto a las especies de pasturas, cultivos y forestales, permitiendo localizar con precisión las áreas potencialmente más aptas en vistas de una racionalización del uso de los recursos productivos;

- conocer más específicamente las limitantes del suelo y con ello, posibilitar su utilización de acuerdo a su capacidad con las medidas adecuadas de manejo del agua, de la fertilidad y de la erosión, tendiéndose a la conservación del recurso;
- precisar la productividad específica de cada suelo (serie) en los diferentes rubros.

La secuencia metodológica para este relevamiento es esencialmente la misma que la utilizada a la escala 1:100.000 pero con una fotointerpretación algo más detallada, especialmente en cuanto a geomorfología y rangos de pendientes que son establecidos con mayor precisión: la misma Asociación de Series de Suelos, con distintas pendientes, constituyen distintas unidades de mapeo, teniendo en cuenta su posterior clasificación por capacidad de uso y uso, manejo y conservación. Se le da también mayor importancia a las fases por erosión actual.

La densidad de muestreo es mucho mayor, lográndose un conocimiento más exacto del suelo (serie), de su ubicación en el paisaje, de los suelos a los cuales se asocia, y se le cuantifican sus áreas totales y relativas dentro de la Asociación. Se muestreó un suelo cada 2.700 hás. La leyenda de esta carta es netamente geomorfológica, dividiendo las Unidades de Mapeo en: Sierras, Colinas, Lomadas, Valles, Planicies, Llanuras, Bañados, Dunas, Aluviones.

Las Unidades de Mapeo son Asociaciones de Series (se introduce el concepto de serie en la clasificación de Suelos) y se les denomina mediante una fórmula cuyo numerador contiene un número correlativo que indica la Asociación, con letras se caracteriza la geomorfología y geología y en el denominador se pone la fase por erosión actual. Se le puede adjetivar además por grado de alcalinidad, salinidad, rocosidad, presencia de escarpas.

En la leyenda se indica la frecuencia de cada serie dentro de la unidad de acuerdo a las siguientes pautas:

Serie Dominante - ocupa más del 40% de la Asociación

Serie Asociada - ocupa entre 10 y 40% de la Asociación

Serie Accesoría - ocupa menos de 10% de la Asociación

La Carta está presentada en un Atlas de fotoplanos controlados a escala 1:100.000 en la que se superponen a la imagen fotográfica los límites de las Asociaciones y la nomenclatura de cada una de ellas.

6. CARTAS DETALLADAS Y SEMIDETALLADAS

Paralelamente a estas cartas a nivel nacional, se han realizado innumerables relevamientos detallados y semidetallados, la mayoría de ellos dentro de un Convenio entre Instituto Nacional de Colonización y la Dirección de Suelos. Estas cartas son en su mayoría a escala 1:20.000, tienen una alta densidad de descripciones, aunque en muy pocas de ellas fueron muestreados los suelos. En total suman unas 300.000 hás.

II. LA CLASIFICACION DE SUELOS DEL URUGUAY

1. CLASIFICACION DE RIECKEN DE 1959

La elaboración del primer esquema de clasificación natural o taxonómica de suelos del Uruguay tuvo lugar en 1958-59 y fue el resultado de los trabajos de un grupo de técnicos nacionales que actuó junto al especialista F.F. Riecken de EE.UU. Estaba basada en la clasificación americana de Baldwin, Kellog y Thorp (1938) revisada posteriormente por Thorp y Smith (1949).

Esta clasificación de 1959 fue modificada primeramente por De León en 1962 y por Marchesi y Durán (1969). Combina características morfológicas con genéticas, dando preeminencia en algunos casos a unas de ellas y en otros casos a las otras.

La clasificación no cumplía con el requisito fundamental de todo levantamiento de tierras de que todos los suelos identificados en el curso del mismo puedan ser clasificados según un sistema uniforme, y presentaba las siguientes limitaciones:

- empleo de criterios desactualizados en las definiciones a nivel de Orden, por ejemplo, suelos zonales-intrazonales-azonales;
- definiciones insatisfactorias en las diversas categorías y fundamentalmente a nivel de Grandes Grupos;
- empleo de propiedades simples como criterio de clasificación, las cuales carecen de todo valor diagnóstico tomadas aisladamente. Por ejemplo: Color, (praderas pardas, negras, rojas) y Textura (praderas arenosas);
- falta de ubicación de algunos tipos de suelos recientemente conocidos en el país.

2. LA CLASIFICACION DE SUELOS DEL URUGUAY DE 1976

Las limitaciones de la clasificación anterior, junto al avance en el conocimiento de los suelos del país, y la necesidad de introducir criterios más actualizados y de valor agronómico, justificaron la elaboración de un nuevo esquema de clasificación.

Se usó como base para este sistema taxonómico la Clasificación de EE.UU. -- (Soil Survey Staff, 1960), la Clasificación de FAO (Dudal, 1968), la Clasificación francesa (Comission de Pedologie et de Cartographie des Sols, 1967) y la Clasificación de Riecken, 1959. Se tomaron en cuenta también los estudios de suelos de la Cuenca de la Laguna Merin (Sombroek, 1969), y los trabajos de la Cátedra de Suelos de la Facultad de Agronomía. Los cambios introducidos son, en ciertos aspectos, bastante importantes, sobretudo en lo referente a elementos diagnóstico utilizados, precisión en las definiciones y en la nomenclatura elegida. Esta nueva clasificación es de tipo natural y de carácter morfogenético.

Las definiciones de las clases se basan en propiedades del suelo, que pueden ser observadas, detectadas y/o medidas y que son el reflejo de procesos pedogenéticos. Los límites se fijan en forma precisa en general cuantitativamente.

Con el nuevo sistema se buscó eliminar las limitantes que presentaban las definiciones de las distintas categorías, lo que supone no solo ajustarlos sino también adoptar una nomenclatura.

Es así que por un lado se mantuvieron aquellos nombres cuyo uso no merecía críticas y que además son utilizados en otras clasificaciones: Ejemplo: Li tosoles - Planosoles.

Por otra parte se abandonaron aquellos considerados inadecuados. "En estos casos se procesó sustituirlos por nombres de agrupamientos de suelos ya -- utilizados y difundidos fuera del país e incluso al menos parcialmente, dentro del país. Estos nombres se han tomado de la leyenda del Mapa Mundial de Suelos de FAO-UNESCO (Dudal, 1968) y en un caso de la Clasificación de EE.UU. (Soil Survey Staff, 1960)"...

Por último, se utilizan nombres originales como Brunosoles y Argisoles.

Estos aspectos generales de la nomenclatura se refieren exclusivamente a la categoría de Gran Grupo ya que a nivel de Orden las diferencias son totales con respecto al Sistema de Riecken.

La Clasificación contiene siete categorías que desde el mayor al menor grado de generalización son las siguientes:

Orden	6
Gran Grupo	15
Subgrupo	6
Clase	12
Subclase	49
Tipo	45
Familias	

El sistema tiende a ser homogéneo en todos sus niveles, es decir que a nivel de una misma categoría el criterio utilizado para establecer subdivisiones es el mismo.

Los criterios utilizados para diferenciar cada categoría fueron:

Orden: Se aplica un criterio fundamentalmente genético; es decir el predominio claro de determinados procesos pedológicos o en caso contrario la no prevalencia de ninguno.

Gran Grupo: Se usa una mayor precisión en cuanto a la dirección y/o intensidad de los procesos pedogenéticos fundamentales.

SubGrupo: Se utiliza la acción clave de un proceso pedogenético secundario, o bien la expresión que ha asumido un factor de formación.

Clase: Se tiene en cuenta propiedades químicas relacionadas con la fertilidad natural del suelo como son: CIC y porcentaje de saturación en bases.

Tipo: En ésta categoría se toman en cuenta el grado de iluviación de arcilla en el perfil.

Familias: Se separan grupos por granulometría del horizonte superficial. Las familias resultan de la generalización del triángulo textural americano aplicado a los suelos del Uruguay.

Las fases son aspectos diversos no contemplados en las categorías anteriores, que en general afectan el valor agronómico: profundidad, pedregosidad, alcalinidad, etc.

Una de las principales diferencias con el sistema anterior es la utilización del concepto de horizonte diagnóstico como característica diferencial a nivel de Orden, Subclase y Tipo.

Los Horizontes Diagnóstico son capas del suelo que resultan de los procesos pedogenéticos cuyas características químicas, físicas y geomorfológicas están perfectamente definidas.

No se entrarán en el detalle de la nomenclatura y definición de estos Horizontes, solo que hay superficiales y subsuperficiales, y que también existen otras características diagnósticas que no son horizontes sino propiedades del suelo.

Un esquema sencillo de la clasificación es el siguiente:

<u>ORDEN</u>	<u>GRAN GRUPO</u>
I. Suelos pocos desarrollados	<div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> { <ul style="list-style-type: none"> LITOSOLES ARENOSOLES FLUVISOLES INCEPTISOLES </div>
II. Suelos Melánicos	<div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> { <ul style="list-style-type: none"> BRUNOSOLES VERTISOLES </div>
III. Suelos Saturados Lixiviados	<div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> { <ul style="list-style-type: none"> ARGISOLES PLANOSOLES </div>
IV. Suelos Desaturados Lixiviados	<div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> { <ul style="list-style-type: none"> LUVISOLES ACRISOLES </div>
V. Suelos Halomórficos	<div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> { <ul style="list-style-type: none"> SOLONETZ SOLONETZ SOLODIZADOS SOLODS </div>
VI. Suelos Hidromórficos	<div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> { <ul style="list-style-type: none"> GLEYSOLES HISTOSOLES </div>

En 1982 se introduce a esta clasificación el concepto de Serie, para permitir una mejor caracterización de las Unidades de Mapeo en vistas de las publicaciones a escalas mayores.

La Serie es a los Suelos lo que la Especie al Reino Animal o Vegetal. Se define como un conjunto de Individuos Suelo, cuerpos tridimensionales de magnitud variable, pero sin variaciones significativas en su perfil, que presentan similar arreglo de horizontes, se desarrollan sobre un mismo material generador, etc. y lo que es más importante, generan respuestas comparables en su uso y manejo, respecto a las plantas naturales, cultivos, pastos, forestales, e incluso obras de ingeniería como carreteras, drenajes, cimientos.

III. CARACTERIZACION DE SUELOS

La caracterización química y granulométrica de suelos se comenzó a hacer en 1966. Hasta este momento se han analizado 1.470 perfiles a los que hay que agregarles 220 que se realizaron en Brasil dentro del trabajo de la Cuenca de la Laguna Merín. Los métodos de análisis utilizados son en su mayoría los de Black (1965).

Otras características físicas y mineralógicas no se hacen en forma rutinaria sino en situaciones de interés especial.

Aún así se han realizado análisis mineralógico de arcillas en unos 100 perfiles, principalmente por los métodos de ATD (análisis térmico diferencial) y Rayos X.

Características físicas como densidad real, densidad aparente, porosidad total, micro y macroporosidad, estabilidad estructural, etc. se han determinado en unos 30 suelos, con distintas técnicas, proyectándose que algunas de estas propiedades pasen a ser analizadas en forma rutinaria. Se han realizado también algunos análisis de la fracción gruesa y fraccionamiento de la materia orgánica.

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

ANTECEDENTES Y METODOLOGIA DE LA COMISION NACIONAL DE ESTUDIO
AGROECONOMICO DE LA TIERRA

Ing. Agr. Raúl Ponce de León

Montevideo-Uruguay

Hasta el año 1968 la tributación agropecuaria giraba en torno a las detracciones de la carne y de la lana gravando el producto y no al recurso con el cual se producía, es decir la tierra. Históricamente se podría ubicar el origen de la idea de la creación del IMPROME, Impuesto a la Productividad Mínima Exigible cuya puesta en práctica ocurre en el año 1974, en los estudios del CIE agropecuario, en donde se refiere a la necesidad de modificar el sistema impositivo del agro.

La Ley 13.695 del 24 de octubre de 1968 establece definitivamente su implantación y de la Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra. Esta Ley contó con el apoyo de los productores, modificó radicalmente los conceptos vigentes en cuanto a la tributación agropecuaria y consideraba que las mejores tierras deben producir más y por ello su contribución debe ser mayor, así como quien más se esfuerce reinvertiendo obtenga mejores rendimientos y se vea beneficiado. Concretamente se quiso racionalizar el régimen impositivo, haciéndole más justo, con un sentido finalista y no fiscalista, gravando a la fuente de producción, la tierra y no al producto.

Para lograr que estas ideas tuvieran una concreción real y práctica, fue indispensable llevar adelante los estudios de productividad de los suelos a nivel nacional y proyectarlos a posteriori a nivel de los predios.

El objetivo era obtener datos referentes a la tierra y su producción que básicamente eran:

a) Determinación y clasificación de la capacidad productiva física de la tierra en términos de carne y lana producción más importante de nuestra economía de acuerdo a lo que señalaba la Ley.

b) Determinación de la capacidad productiva fiscal de cada padrón.

c) Desarrollo de un sistema a fin de calcular y preparar la recaudación de los aportes.

d) Quizás lo más importante para los técnicos que trabajaron en todo el proyecto, que era la obtención de mayor documentación para ser utilizada

por distintos organismos en la elaboración de planes de desarrollo. Es decir que, además de los objetivos en materia fiscal, señalados expresamente por la Ley en cuanto a determinación y clasificación de la capacidad productiva de la tierra, el trabajo llevado a cabo proporciona una documentación de importancia significativa para otros usos, como ser: preparación de información básica para uso universal en proyectos y programas de desarrollo, orientación a los organismos públicos vinculados al crédito rural, investigación, programas agrícolas, redistribución de la tierra, obras de infraestructura, etc.

También el sector privado podría disponer de una importante documentación que le permitiría un mejor aprovechamiento de la tierra, lo cual repercutiría en las producciones más apropiadas. Cerca de 10.000 productores han utilizado desde 1974 la información básica que proporciona CO.N.E.A.T.

Las posibilidades reales de concretar estas aspiraciones estaban dadas en la medida que se consiguiesen aunar esfuerzos y se aprovechara al máximo la capacidad técnica y de realización de los organismos existentes, completando o supliendo carencias y deficiencias, ya que, la amplitud del programa, lo variado y complejo, así lo exigía.

Para fijar la capacidad productiva de cada inmueble se tomó en cuenta las posibilidades de producción de las asociaciones de suelos integradas en los grupos de productividad CO.N.E.A.T. en que se halla radicado el inmueble y la ubicación del mismo.

- Elementos con que se contaba para realizar los estudios en 1968

- a) Recubrimiento fotográfico de todo el país, realizados en el año 1967 a escala 1/20.000 y 1/40.000.
- b) Un catastro rural iniciado en el año 1912, con lógicas limitaciones
- c) Estudios sobre clasificación y cartografía de suelos, aunque todavía faltaba mucho por realizar.
- d) Estadística en cuanto a los volúmenes de producción nacional.

La Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra integrada por Delegados del Ministerio de Agricultura y Pesca, Ministerio de Economía y Finanzas, Secretaría de Planeamiento, Coordinación y Difusión, Instituto Nacional de Colonización, Asociación Rural del Uruguay, Federación Rural; funcionarios técnicos del Servicio Geográfico Militar (Grupo Fotográfico de la F.A.U. integración reciente), Dirección General del Catastro Nacional, Dirección de Suelos, Dirección de Programación y Política Agropecuaria y observadores de la Asociación de Ingenieros Agrónomos del Uruguay y Federación Uruguaya de Centros Regionales de Experimentación Agropecuaria (FUCREA); debió programar y coordinar los trabajos, así como elaborar la metodología general, realizar los estudios de productividad, procesar la documentación recibida de las otras oficinas técnicas ejecutivas y confeccionar el documento final.

Al Servicio Geográfico Militar le correspondió el procesamiento del material fotográfico, la Dirección General del Catastro Nacional debió actualizar las nuevas láminas catastrales y a la Dirección de Suelos le correspondió la realización de la clasificación y cartografía de los suelos del país.

En primer término se resolvió que la cartografía catastral y de suelos se representaran sobre materiales cartográficos básicos (fotopositivo tramado y fotoplano), provenientes de la imagen de las fotografías aéreas a escala 1/40.000.

De acuerdo a este criterio la Dirección General de Catastro Nacional, confeccionó las nuevas láminas catastrales y la Dirección de Suelos, las cartas de suelos en documentos independientes, para que superpuestos produjeran un tercero que contiene la infraestructura, la división de tierra (padrones) y la cartografía de suelos.

Sobre este último documento cartográfico es posible medir para cada padrón las superficies de las asociaciones de suelos integradas en los Grupos de Productividad CO.N.E.A.T., que lo componen y su relación porcentual.

Por otra parte, una vez determinada la productividad para los diferentes grupos de suelos CO.N.E.A.T. por simple cálculo matemático se puede calcular la productividad media del padrón.

La operación cartográfica final consistió entonces en superponer la plancha catastral, con la cartografía de los grupos de productividad (ambos documentos a la escala 1/20.000) y obtener luego de un proceso fotográfico realizado en la Dirección de Suelos, una lámina definitiva en material estable, que comprende como ya dijimos toda la infraestructura de caminería, padrones y las líneas de productividad.

Paralelamente se midió con planímetro cada una de las asociaciones de suelos, teniendo como resultado las superficies que ocupan cada asociación en el Sector Censal (que era en ese momento la unidad de superficie a que se referían los datos referentes a producción y que son de superficie variable y abarca varios tipos de suelos) y por simple suma en el Departamento y en el País. Estando por lo tanto en conocimiento a nivel censal, de las cifras de producción de lana, de stock de haciendas, de su clasificación y las superficies de los diferentes suelos que lo integran.

Los métodos que han debido aplicarse para llevar estas cifras de productividad a nivel de Sector Censal a cada una de las asociaciones de suelos, tiene su complejidad y requirió el uso de métodos matemáticos como fue el realizar regresiones múltiples de los factores en juego para lo cual se requirió el uso de computadoras.

Los datos proporcionados por ésta en varios casos, especialmente en aquellas asociaciones de suelos que ocupan más superficie, resultaron válidos con más de un 95% de seguridad y respondieron a lo esperado. Fue necesario completar los valores de productividad de las asociaciones de suelos donde los resultados de la computadora no fueron válidos y se buscó establecer en forma subjetiva una relación porcentual de productividad de acuerdo a la fertilidad, profundidad del suelo y demás condiciones de la tierra, así como de sus pasturas y su relación con las otras Asociaciones de Suelos cuya productividad fueron fijadas por la regresión. Esto se hizo en base a consultas entre productores técnicos y técnicos especializados con gran experiencia y conocimiento del País. Método de Delphi.- encuestadores calificados.

En definitiva se determinó la productividad de 188 asociaciones de suelos para todo el país.

Se consideró además de gran interés establecer una relación entre el Índice de Productividad (Valor CO.N.E.A.T.) y el Valor Real, acordándose que este último fuera dependiente del primero.

Para esto se fijaron factores modificativos del índice de productividad de acuerdo a la influencia de los diferentes centros poblados y ubicación de frentistas a las carreteras, categorizadas según su importancia.

Como resultado de todo el proyecto CONEAT se obtuvieron 1.204 láminas a escala 1/20.000 la que contiene la información de catastro y de suelos. Sobre estas láminas se procedió a la medición de cada una de las asociaciones de suelos que integran cada padrón, así como su identificación y ubicación. Mediante el uso de computadoras se le incorporaron a estos datos el nombre del propietario, la superficie y los factores de corrección referentes a la posible influencia de algún centro poblado. Esto se realizó para los 200.000 padrones que aproximadamente tiene el país.

El Índice de Productividad final del padrón, resultante de ponderar el porcentaje de cada grupo de suelos CONEAT y su correspondiente I. de Productividad, lo relaciona con el Índice Promedio Nacional que es 100.

Cada 4 años se realizan los estudios de productividad básica física nacional, Por medio de estos estudios se determina la superficie del país dedicada a la producción de carne y lana y los volúmenes a producir. En el estudio vigente se determinó que la producción básica por hectárea a regir para el período 1981/1984 sería:

43,7 Kgr. de carne bovina por Ha.

8,2 Kgr. de carne ovina por Ha.

4,3 Kgr. de lana por Ha.

Estos kilos corresponden para el índice 100, como la relación entre el promedio nacional y el de cada padrón es lineal a un índice de 150, se le exige a los efectos fiscales producir un 50% más.

Lo más importante quizás de todo esto, independientemente de si se logró o no un impuesto más justo y equitativo para las actividades agropecuarias, que no viene al caso en este momento, es la obtención de toda esta información a la que hacíamos

referencia y la infraestructura existente actualmente, así como el personal técnico formado en estos años.

Toda la información gráfica se encuentra disponible en las láminas originales o microfilmadas que por medio de lectores impresores están disponibles a los usuarios en forma inmediata. La información referente a los diferentes padrones del país está bajo computadoras y su utilización en cualquiera de sus formas es prácticamente en tiempo real. Esta base de información existente es fundamental como banco de datos para todo lo referente a los recursos naturales, elementos básicos para la planificación y el desarrollo de nuestra sociedad, así como para suministrar y archivar la información necesaria y generada en cualquier cuenca experimental que se instrumente.

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES
Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

ORIENTACION DEL MEJORAMIENTO DE PASTURAS
EN EL URUGUAY

Ing.Agr. Fernando Santifiaque

Montevideo-Uruguay

El Uruguay cuenta con 16.000.000 de hectáreas de las cuales aproximadamente el 87 por ciento lo constituyen pasturas naturales, desarrolladas sobre suelos no arables y en menor proporción sobre suelos potencialmente cultivables.

Si bien los diferentes suelos determinan importantes diferencias tanto cuantitativas como cualitativas en las pasturas naturales, existen características generales comunes a las diferentes zonas.

Estas constituyen un tapiz herbáceo que cubre todo el territorio nacional o lo cubrió en algún momento (áreas agrícolas), el cual está integrado principalmente por gramíneas perennes, existiendo además malezas de distinto tipo como las arbustivas y espinosas.

Las leguminosas en general son escasas pudiendo en algunos suelos alcanzar proporciones variables.

Las pasturas naturales sobre los distintos suelos del país difieren en su productividad total anual y en la distribución estacional de dicha producción.

Sin embargo, en términos generales la producción total es baja y la distribución estacional determina importantes deficiencias de forraje en invierno. Se suma a esto el hecho de que en general presentan calidad media a baja.

El grueso de la producción de carne y lana del país se realice sobre esta superficie de pradera natural. Cabe señalar que estas producciones representan para el país aproximadamente el 70 por ciento de sus exportaciones anuales.

Estos aspectos reflejan la importancia de dichas producciones para la economía del país y en cierta medida también el marco tecnológico en el que se desarrolla la actividad ganadera.

A partir de 1900 se llega a la dotación tope la cual hasta el presente no se ha modificado mayormente, siendo aproximadamente 0.7 - 0,8 U.G./ha. El stock ganadero nacional (bovinos + ovinos) se ha mantenido aunque con fluctuaciones en la relación Ovino/Bovino.

Se considera que hace ya casi un siglo que se alcanzó una dotación capaz de consumir la producción anual de forraje de las pasturas naturales. La producción de carne y lana por hectárea de pastoreo es reflejo de esta situación, la misma se ubica en valores promedio de 60 kg/ha/año de carne equivalente (Kgs. de carne vacuna en pie + Kg. de carne ovina en pie + Kgs. de lana sucia x 2.48).

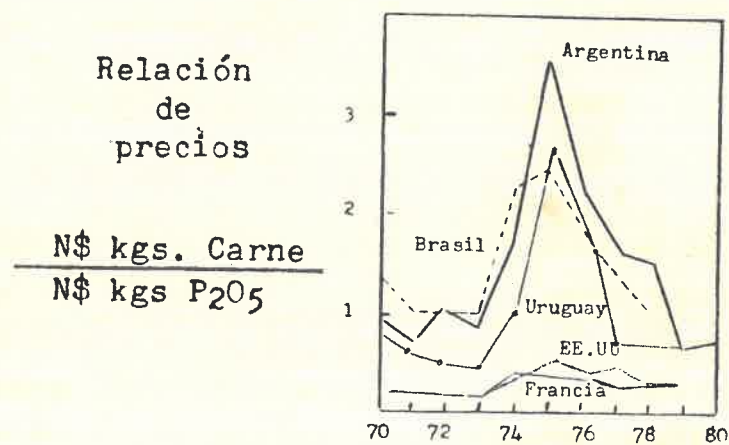
Estos niveles productivos por hectárea de pastoreo son bajos en relación a los obtenidos en otros países y a los que potencialmente se han logrado en el país en base a la realización de mejoramiento de pasturas.

Por otra parte cabe destacar, que los niveles de producción mencionados se mantienen con poca variación desde la década del 30 hasta nuestros días.

Del total de superficie bajo pastoreo la proporción de pasturas mejoradas representó siempre un porcentaje muy bajo, aproximadamente un 5%, alcanzando su máxima expresión en 1975 donde se alcanza el 11 por ciento (aproximadamente 1.600.000 has.), para luego disminuir nuevamente siendo actualmente esta proporción de aproximadamente 4.8 por ciento.

La causa principal de estos bajos porcentajes de pasturas mejoradas radica en bajos niveles de adopción por parte de los productores de la tecnología disponible.

Este aspecto constituye un tema complejo que escapa a los objetivos de esta exposición. Sin embargo, la gráfica siguiente muestra para la década del 70 cuántos kilos de carne debían pagar distintos países para comprar 1 kg. de P₂O₅ (uno de los insumos principales para el mejoramiento de las pasturas).



Es claro que los productores de Uruguay siempre pagaron más kilos de carne por kilo de fósforo que en los países desarrollados y a veces mucho más como en 1975-76. El atraso en el mejoramiento de pasturas tendría su explicación en relaciones como las vistas.

En función de lo expresado, es posible afirmar que el principal factor limitante de la producción ganadera del Uruguay lo constituye el nivel de alimentación basado casi exclusivamente en el pastoreo de las praderas naturales.

Orientación del mejoramiento de pasturas

La toma de conciencia acerca de la existencia de un problema forrajero en el país, se produce en la década de 1930.

A partir de entonces, y en los años subsiguientes se avanza en dos sentidos: por un lado, en la sustitución del tapiz natural por especies forrajeras que cubrieran los períodos críticos estacionales del campo natural (avena principalmente) por otro comienza a plantearse el estudio sistemático de la pradera nativa y su forma de manejo con la finalidad de mejorar su productividad.

En 1935 se crea la Comisión para el Estudio del Problema Forrajero con el cometido de estudiar y buscar soluciones a la insuficiencia forrajera de las pasturas naturales.

A su vez en 1934 se inician los "Estudios sobre praderas naturales del Uruguay" investigaciones proseguidas durante 12 años por Rosengurtt y colaboradores y que producirían cinco publicaciones en el período 1938 a 1946, las que constituirán hasta hoy el intento más riguroso para estudiar las características específicas de las praderas naturales del país.

A principios de la década del 50 el gobierno del Uruguay inicia gestiones ante el Banco Mundial para lograr el financiamiento de un "Proyecto de Mejoras Básicas para el desarrollo de la producción ganadera". Se solicitaron recursos al Banco Mundial y asistencia técnica a la FAO para alambrados, aguadas y montes de abrigo, lo que permitiría el aprovechamiento más completo de las praderas nativas.

Sin embargo, en las discusiones mantenidas con los especialistas del Banco Mundial entre ellos el Dr. Mc Meekan especialista neozelandés, la tesis que previó fue la de estos últimos. La misma consistía, en oposición a la anterior, en la promoción del mejoramiento integral progresivo, partiendo de un mínimo del 5% de la superficie de cada establecimiento involucrado en el plan.

El mejoramiento del 5% de cada establecimiento se haría de acuerdo al modelo neozelandés el cual se basa en el aumento de la fertilidad del suelo como soporte del mejoramiento en cantidad y calidad de la producción forrajera del tapiz.

El incremento de la fertilidad de los suelos del Uruguay implica el aumento de la disponibilidad de los nutrientes más importantes en función de su deficiencia para la nutrición de las pasturas: nitrógeno y fósforo. Se plantea el uso de fertilizantes fosfatados que aportaran directamente el fósforo y el nitrógeno en forma indirecta a través de leguminosas forrajeras.

Así según las diferentes situaciones preexistentes se plantean distintas alternativas apoyadas en este principio general:

a. Pasturas cultivadas o convencionales: instalación de praderas mezclas (gramíneas y leguminosas) fertilizadas con fosfatos. El laboreo es convencional, es decir, incluye la roturación y afinamiento del suelo por métodos convencionales, con la finalidad de destruir el tapiz natural, evitando la competencia que el mismo implica para la implantación de las nuevas especies.

b. Siembra directa o con mínimo laboreo sobre el tapiz natural de leguminosas, junto con fertilización fosfatada que facilite en una primera etapa el desarrollo de las nuevas especies. En una segunda etapa, el incremento de la fertilidad del suelo incidirá en una mayor productividad de todo el tapiz y en particular de las gramíneas autóctonas.

c. Fertilización fosfatada del campo natural. El resultado dependerá fundamentalmente de la presencia de leguminosas nativas o subespontáneas que cumplan el papel que en los casos anteriores se asigna a las especies incorporadas.

Este enfoque marca cambios importantes en el análisis del problema forrajero. Por un lado marca el inicio del uso de fertilizantes fosfatados para la producción de pasturas y por otro, se comienza a dar importancia a la introducción o el aumento de la proporción de leguminosas en las pasturas.

Cabe señalar que esto significó un cambio de orientación en la investigación en pasturas, en relación a la prevaleciente hasta 1950, que se podría resumir como un intento por conocer el potencial de las pasturas naturales antes de iniciar una etapa de mejoramiento basada en su fertilización e introducción de nuevas especies.

Este aspecto aún hoy sigue pendiente en la medida que los recursos de la investigación nacional se han asignado fundamentalmente al nuevo enfoque.

En el período de 1960-1976 se destaca el comienzo de la actuación de la Comisión Honoraria del Plan Agropecuario (institución creada para la difusión de la nueva tecnología; su actuación comienza efectivamente en 1961 tras la obtención del primer préstamo del Banco Mundial) y por el impulso que recibe el proceso de generación de tecnología.

Se reorganizan y se impulsan tareas de investigación y de difusión en la órbita del sector público, destacándose la creación del Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerger" (CIAAB) en 1961 como continuador del Instituto Fitotécnico y Semillero Nacional "La Estanzuela".

Por su parte la Facultad de Agronomía comienza a efectuar ensayos con forrajeras en la segunda mitad de la década del 60.

Hacia 1966 el CIAAB pone en marcha sus Proyectos Regionales de Producción de Pasturas, instalando experimentos en diferentes zonas del país.

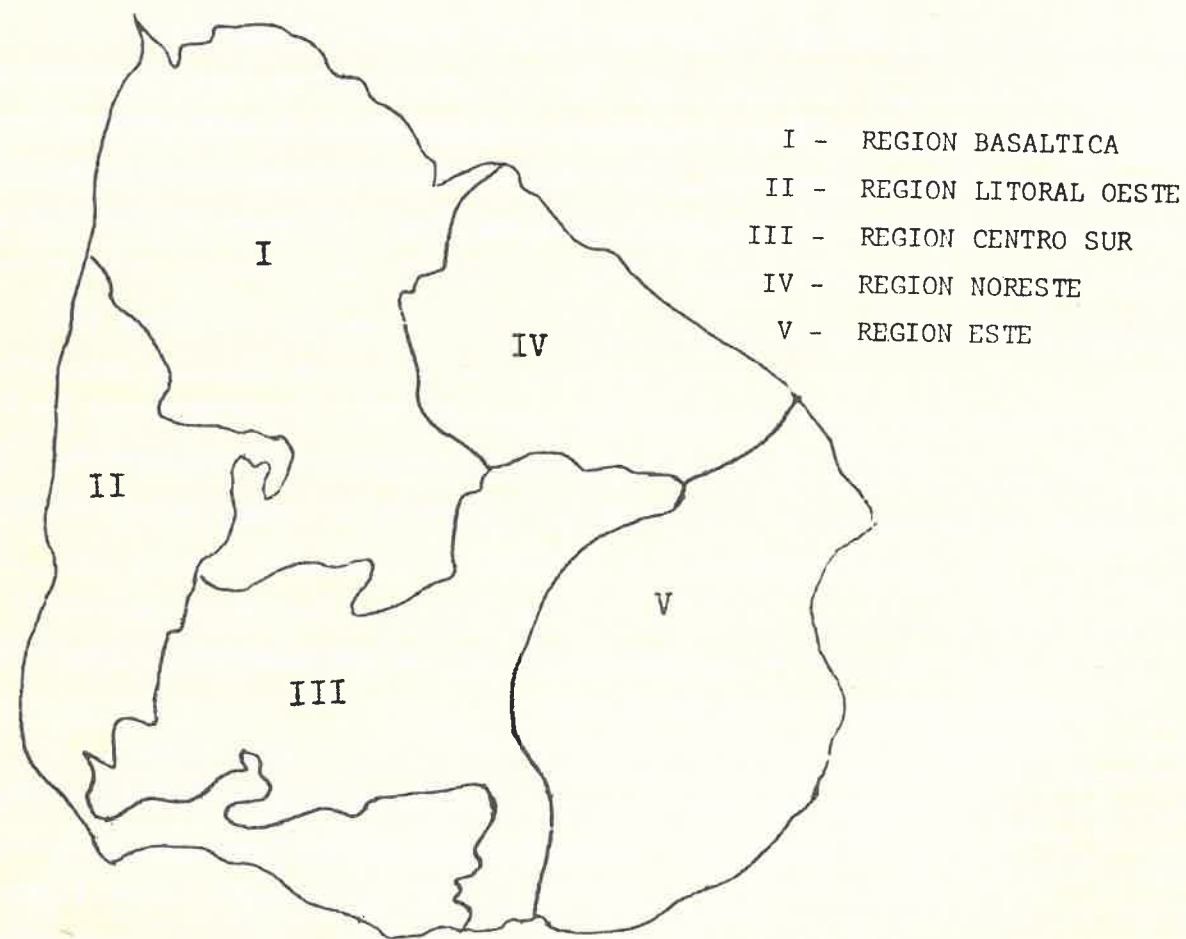
Estos experimentos constituyen al presente el intento más sólido de obtener información relativa a la producción y mejoramiento de pasturas naturales a través de la fertilización e introducción de leguminosas así como al comportamiento de las pasturas cultivadas en aquellos suelos que admiten el laboreo convencional.

Resulta importante señalar a continuación las características generales de dicho esquema de investigación, así como un resumen de los principales resultados obtenidos.

Este programa de investigación que se inicia por parte del CIAAB a mediados de la década del 60 y se desarrolla hasta mitad de la del 70, tuvo por objetivos obtener información sobre el potencial de mejoramiento de las pasturas naturales ubicadas sobre distintos suelos del país.

Proyectos Regionales de Producción de Pasturas

Estos estudios se lleva a cabo mediante Proyectos distribuidos en cinco regiones: Región Basáltica, Región Centro-Sur, Región Este, Región Litoral y Región Nor-este (Véase Mapa).



Se estableció una red de experimentación muy amplia cubriendo aproximadamente 13.000.000 de hectáreas, o sea un 70 por ciento del territorio nacional.

A su vez cada región se dividió teniendo en cuenta los diferentes suelos que la integran.

Se instaló una red de estaciones agroclimatológicas en el país, con el objetivo de obtener la información requerida para la correcta interpretación de los resultados a nivel nacional y regional. Se realizaron estudios de balance hídrico de los suelos de las principales regiones.

Desde que las pasturas naturales representan alrededor del 87 por ciento de la superficie del país se puso especial énfasis en los estudios dirigidos a incrementar la productividad de dichas pasturas, mediante técnicas como la fertilización con fosfatos y la introducción de leguminosas en los diferentes tipos de tapiz natural.

En los diferentes suelos se instalaron experimentos que compararon cuatro alternativas:

1. Pastura natural; 2. Pastura natural fertilizada con fosfatos; 3. Fertilización con fosfatos y siembra de leguminosas en la pastura natural y 4. Praderas cultivadas o convencionales en aquellos suelos donde es factible su instalación (suelos arables).

El análisis conjunto de la información experimental correspondiente a los distintos suelos ha permitido tener un panorama general sobre los mejoramientos de pasturas en el Uruguay. Esta información se resume en los siguientes cuadros:

Cuadro 1 - Rendimientos de pasturas en el Uruguay (Ton.MS./ha./año)

	P.Nat / P		P.Nat./ P / Leg.	P.conv.
	P.Nat.	P		
Basalto superficial	0.8	0.9	1.4	-
Basalto profundo	3.8	4.2	5.6	8.9
Cristalino superficial	1.8	2.2	3.4	-
Cristalino profundo	2.1	4.0	4.5	9.0
Cuenca Lag.Merín Sierras	1.4	2.1	5.0	-
Cuenca Colinas	2.0	2.5	6.0	-
Cuencas Lomadas	2.5	3.2	5.0	6.8
Cuencas Llanuras	1.5	1.5	5.0	10.0
Fray Bentos	4.0	5.6	6.0	9.6
Pampeano	3.5	5.0	5.4	9.1
Cretáceo	1.5	1.8	2.6	3.0
Areniscas Tacuarembó	2.5	3.0	4.3	5.8
Fraile Muerto	3.6	6.3	6.4	9.1
Yaguarí	2.5	3.1	5.0	7.5
Aluv.modernos NE Planosol	2.3	2.8	8.6	9.4
Aluv.modernos NE Gley	2.3	2.9	7.2	9.0
Promedio	2.4	3.2	5.1	8.1

Cuadro 2: Orden creciente de respuesta de las diferentes pasturas a distintos tipos de mejora (porcent.de incremento sobre P.Nat)

FERT. P		FERT. P / LEG		P. CONV.	
Basalto Prof.	11	Basalto Prof.	47	Cretáceo	100
Basalto Sup.	13	Fray Bentos	50	A. Tac.	132
A. Tac.	20	Pampeano	54	Basalto Prof.	134
Cretáceo	20	A. Tac.	72	F. Bentos	140
Crist. Superf.	22	Cretáceo	73	F. Muerto	153
Lag.Merín Col.	25	Basalto Sup.	75	Pampeano	160
Aluv. Mod. NE	26	F.Muerto	78	Lag.Merín Lom.	172
Lag.Mer.Lom.	28	Crist. Superf.	89	Yaguarí	200
Yaguarí	28	Yaguarí	100	Al. Mod. NE	300
Fray Bentos	40	Crist. Prof.	114	Crist. Prof.	329
Pampeano	43	Lag. Mer. Cól.	200	L. Mer. Llan.	566
Lag.Mer. Sierr.	50	Lag. Mer.Llan.	233		
Fraile Muerto	75	Aluv. Mod. NE	243		
Crist. Prof.	90	Lag.Mer.Sierr.	257		
PROMEDIO	35		120		217

Se evidencia que en términos generales la productividad de las pasturas naturales puede ser elevada considerablemente mediante diferentes técnicas (Cuadro 1).

No obstante la respuesta a estos tratamientos es muy variable en los distintos suelos. Por consiguiente es lógico que se registren respuestas económicas diferentes según las características de cada zona y el método de mejoramiento aplicado. Un mismo método en los distintos suelos puede producir respuestas en producción muy diferentes en base a costos muy similares (Cuadro 2).

Es importante destacar que el planteo de estos experimentos regionales fue muy valioso, y ha permitido contar con conocimientos generales sobre la productividad de las pasturas naturales, su fertilización y la adaptación de leguminosas a los diferentes suelos, así como métodos adecuados para implantarlas en el tapiz.

Lamentablemente esta línea de trabajo se interrumpió casi totalmente a partir de mediados de la década del 70.

A partir de ese momento la investigación que se venía realizando considerando una importante proporción del territorio nacional, especialmente áreas ganaderas,

se restringe a zonas más intensivas de producción principalmente agrícola ganadera o lechera, que constituyen el área de asiento de las principales estaciones experimentales del país. Esto obviamente condiciona el enfoque de la investigación que se realiza a partir de ese momento, concentrándose los estudios de los últimos años casi exclusivamente en pasturas cultivadas.

De lo expuesto se desprende que con excepción de los experimentos regionales mencionados, la mayor parte de los trabajos anteriores y posteriores a dicho programa, se concentraron en aspectos relativos a pasturas cultivadas contándose al momento con un mayor volumen de información que el relativo al mejoramiento de las pasturas naturales.

Como consecuencia de esto, la información disponible en este tema, si bien constituye un gran avance de la investigación, constituye una primera aproximación, habiendo muchos aspectos que merecerían la continuación de dichos trabajos.

En este sentido, se están realizando algunos intentos por retomar el tema con experimentos de largo plazo con el objetivo de profundizar en conocer y controlar los factores que afectan la implantación, productividad y duración de los mejoramientos de pasturas naturales.

REFERENCIAS

1. ALONSO, J.M. y PEREZ ARRARTE, C. "El modelo neozelandés". Un intento de superación del modelo de producción ganadera uruguaya. In Anales del Primer Congreso Nacional de Ingeniería Agronómica, 1980. Montevideo - Uruguay
2. ASTORI, D. La evolución tecnológica de la Ganadería Uruguaya 1930-1977. 1977. Ediciones de la Banda Oriental, Montevideo - Uruguay
3. CONVENIO AACREA - BMA - FBPBA. Aspectos económicos del empleo de fertilizantes en el agro. Buenos Aires, julio de 1980
4. MORON, A. Introducción a la fertilización de pasturas en Uruguay - 1983. Rep. mimeo
5. PASTURAS IV. Misc. 18, 1978. CIAAB - MAP

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

DEGRADACION DE TIERRAS:
IDENTIFICACION Y DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

Ing. Agr. Ruben Puentes

Montevideo-Uruguay

DEGRADACION DE TIERRAS: IDENTIFICACION Y

DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

Ing. Agr. Ruben Puentes

1. INTRODUCCION

1.1 IMPORTANCIA DEL SECTOR AGROPECUARIO EN LA ECONOMIA NACIONAL

El sector rural del Uruguay ocupa, como en la mayor parte de los países latinoamericanos, una posición clave dentro de la economía nacional. Sin embargo, a diferencia de otras naciones de la región, esa situación no surge de la magnitud de su Producto Bruto, que llegó solamente a un 12% del Producto Bruto Nacional en 1981, ni tampoco, de la población que ocupa en forma directa, ya que sólo un 20% de la población reside en predios rurales.

La importancia del sector radica fundamentalmente en el lugar que ocupan sus productos en las exportaciones: el comercio exterior depende prácticamente en más de un 80% de productos de origen agropecuario fundamentalmente alimentos y materias primas, que son exportados con relativo escaso procesamiento industrial posterior. Las divisas generadas por estas exportaciones son básicas para el funcionamiento del resto de la economía, dinamizando otros sectores productores con menores ventajas comparativas, y financiando las exportaciones, fundamentalmente de petróleo.

La dinámica del sector agropecuario se basa en la disponibilidad y productividad del recurso tierra*, que son altas comparadas con la de otros recursos naturales existentes, y en segundo término, en la calidad del recurso humano que lo trabaja. La disponibilidad de tierras en el país es excepcionalmente favorable. Este factor puede ser analizado desde tres puntos de vista:

- a. Tierras productivas en relación con el total de la superficie del país: alrededor del 90% del territorio tiene uso agropecuario, correspondiendo el resto a áreas urbanas, caminería, lagunas y escasas áreas improductivas. El promedio para América Latina es del 30%.
- b. Superficie de suelo útil por habitante: Uruguay posee más de 6há/habitante de tierras con uso agropecuario, cifra quizás únicamente superada por Australia, y similar a la de Argentina. El promedio para América Latina es de 2.5 Há/habitante (FAO, 1967).

*/ Cuando se menciona el recurso "tierra" en este trabajo, se hace referencia al sistema suelo-vegetación natural-clima.

c. La calidad de las tierras: el país se encuentra enclavado en una de las áreas de mayor potencialidad de producir alimentos a nivel mundial. Las ventajas comparativas de ésta región de la cuenca del Plata son muy altas, y han sido comparadas a las de la región de los Grandes Lagos y Nueva Inglaterra en U.S.A. y algunas áreas de Europa (Vischer, 1955),

Las posibilidades de incrementar la producción del sector se basan en un uso más racional de los recursos ya que la frontera agropecuaria prácticamente ha logrado ya hace décadas su máxima expansión posible. Sin embargo, los índices que se obtienen están mostrando estancamiento y hasta retroceso: ese 12% actual del P.B. del sector se compara desfavorablemente con un 17% que se lograba en la década del 60. Son diversas las razones que se han esgrimido para explicar estas tendencias: estancamiento tecnológico, políticas económicas equivocadas, etc. La disminución de la capacidad productiva de la tierra, por erosión, degradación de pasturas y otras formas de deterioro seguramente también están influyendo en el proceso.

1.2. BREVE ANALISIS SECTORIAL DEL ESTANCAMIENTO PRODUCTIVO

El Cuadro N° 1 muestra índices de productividad del sector pecuario en Uruguay, comparado con la situación en Argentina y Nueva Zelandia. En 1975, la productividad de la tierra en Uruguay era solamente un 56% de la de Argentina o 32% de la de Nueva Zelandia.

CUADRO N° 1 COMPARACION DE INDICADORES DE PRODUCTIVIDAD EN EL SECTOR GANADERO. (Uruguay, 1961=100)

A Ñ O S	CARNE BOVINA ¹			LANA ²		
	Uruguay	Argentina	Nueva Zelandia	Uruguay	Argentina	Nueva Zelandia
1961	100.0	147.8	255.1	100.0	125.0	171.9
1966	102.9	168.1	288.4	103.1	125.0	171.9
1970	105.8	189.9	326.1	112.5	131.2	168.8
1974	107.2	171.0	305.8	106.2	140.6	159.4
1975	107.2	191.3	330.4	115.6	146.9	165.6

(1): Kilogramos por há.

(2): Kilogramos por cabeza.

Fuente: Reca y Regúnaga (1978).

Los bajos rendimientos son también comunes en la agricultura extensiva en prácticamente todos los cultivos excepto arroz (Cuadro N° 2). El principal cereal, el trigo, ha experimentado un estancamiento notable en sus rendimientos, agravado si se consideran los importantes avances tecnológicos de las últimas dos décadas en fertilización, variedades, sanidad, control de malezas, etc.

CUADRO N° 2 RENDIMIENTOS PROMEDIOS DE CULTIVOS SELECCIONADOS. (kilogramos por hectárea)

A Ñ O S	Trigo	Girasol	Sorgo	Maíz
1961/1965	938	496	501 ¹	622
1966/1970	904	528	890	660
1971/1975	1.044	567	1.549	971
1976/1977	955	455	1.770	975
1978/1979	795	396	n.d	541
1979/1980	1.342	n.d	n.d	n.d

(1): Se refiere sólo a 1965 cuando el sorgo se convirtió en un cultivo importante en Uruguay.

FUENTE: Ministerio de Agricultura y Pesca.

En qué grado éste estancamiento en la ganadería y en la agricultura está siendo afectado por la degradación del recurso tierra es una pregunta para la cual no se poseen aún datos para una respuesta medianamente cuantitativa. Sin embargo, los procesos de deterioro, en suelos y pasturas, como luego se expondrá, son tan evidentes, que imponen una urgente atención para evitar que transpongan umbrales de irreversibilidad.

Los objetivos de este trabajo son:

1. Establecer un diagnóstico de la situación de la degradación del recurso tierra en el país, identificando los procesos dominantes, su extensión y los grados de deterioro.
2. Diseñar una hipótesis sobre las tasas a las que están operando esos procesos y sobre los posibles efectos en la productividad, de manera de obtener unas pautas para la asignación de prioridades de programas de acción y en especial, de investigación.

2. DIAGNOSTICO

2.1 LEVANTAMIENTOS DEL DETERIORO DEL RECURSO TIERRA

El primer diagnóstico que cuantifica el grado de deterioro del recurso a nivel nacional es bastante reciente (Cayssials et al, 1978). Es necesario señalar que se realizó sobre la base de un relevamiento aerofotográfico tomado en 1966, y que evalúa únicamente a la erosión de suelos como proceso de degradación. Concluye que el 30% del territorio nacional está afectado por algún grado de erosión, y que las áreas más deterioradas se concentran en las regiones originalmente más productivas.

Un segundo diagnóstico se realizó más recientemente con motivo de una misión interagencial FAO-PNUMA-UNESCO (1983) para estudiar el problema de la desertificación en el país. Este estudio incluye otras formas de degradación, aparte de la erosión. Plantea una tipología y una gradación de acuerdo a la naturaleza y avance del deterioro. Por ser más reciente y más global se lo toma como documento base para este trabajo, utilizándose su metodología con ligeras modificaciones.

2.1.1 Tipología de la degradación

Para la tipología adoptada se consideró el estado de dos* componentes básicos del sistema: la vegetación natural y el suelo. Para cada uno de ellos se estudió el grado de perturbación desde el punto de vista del impacto que se ha originado por el grado de artificialización alcanzado. En algunos casos se realizaron inferencias en cuanto al tipo de proceso de deterioro dominante.

Para el componente "suelo" se consideraron grados crecientes de deterioro, desde un estado no perturbado hasta un extremo en donde ha sido completamente destruido, pasando por etapas intermedias de degradación de propiedades físico-químicas, pérdidas crecientes de suelo por procesos de erosión laminar, erosión en cárcavas, suelo truncados, etc. Para "vegetación natural" se consideró un estado no perturbado (virgen), y etapas de alteración crecientes por disminución de la fitomasa aérea y alteración de la composición botánica hasta la destrucción total del tapiz por erosión o roturación.

*/ La metodología original del documento de FAO-PNUMA-UNESCO considera también la fauna, como un tercer componente. En este trabajo solo se lo toma en cuenta para los sistemas naturales (Nt).

Originalmente se identificaron trece "tipos" principales de los cuales diez aparecieron en extensión suficiente como para ser considerados a la escala de este trabajo (1:1.000.000). Estos tipos se agruparon en tres familias en función del uso generalizado del sistema:

- a) sistemas naturales (Nt)
- b) sistemas ganaderos (G₁ a G₄)
- c) sistemas de cultivos (C₂ a C₆)

Una definición para cada uno de los "tipos" establecidos aparece en el Apéndice I.

2.1.2 Los grados de deterioro

La asignación del grado de deterioro para los distintos "tipos" identificados consideró fundamentalmente estimaciones de la pérdida de productividad del sistema, combinadas con magnitud y características de las medidas preventivas y de rehabilitación necesarias, o posibles cambios en el ordenamiento del uso de la tierra. El carácter estimativo de las pérdidas de productividad no debe ser perdido de vista.

La metodología para elaborar una carta final consistió en partir de un mapeo de tipologías y asignarle a cada "tipo" un grado de deterioro según las pautas que se explicitan más adelante. La escala de la cartografía (1:1.000.000) solo admite un grado relativo de uniformidad dentro de las unidades de mapeo. La información existente, sin embargo, permite un mayor detalle descriptivo. Para no perder información y enriquecer el resultado se llegó a una leyenda donde se reconocen, para cada unidad, grados dominantes, asociados y accesorios de degradación. Se considera dominante un grado que sea el característico para más del 50% de la superficie de la unidad; asociado aquel que ocupa entre 10% y 40%, y accesorio aquel que ocupa menos del 10% del área.

Se establecieron cinco grados, y las pautas utilizadas para asignarlos fueron las siguientes:

1. Para tierras de cultivo de secano:

- | | |
|---------------------|---|
| <u>NULO (N)</u> | Sistemas no alterados (muy restringido). |
| <u>LEVE (L)</u> | Erosión leve o moderada, generalizada y local, que requiere medidas sencillas de condicionamiento y acciones generalizadas de prevención. Pérdidas de producción de hasta 10% de la producción anterior. |
| <u>MODERADO (M)</u> | Erosión grave generalizada y local, que requiere medidas de condicionamiento y algunas de rehabilitación, y medidas generalizadas de conservación reforzadas por la mejora de gestión; pérdidas de producción de hasta 25% de la producción anterior. |

AGUDO (A)

Tierras gravemente erosionadas e improductivas localmente; requieren medidas generalizadas de rehabilitación y de conservación reforzadas por la mejora de suelos y de gestión; pérdidas de producción entre 25% y 50% de la producción anterior.

EXTREMO (E)

Grandes zonas baldías y no cultivables, con erosión extrema, que requieren considerable rehabilitación, antieconómica a nivel local. Pérdidas de producción superior a 50% de la producción anterior.

2. Para tierras de pastoreo:

NULO (N)

Sistemas no alterados.

LEVE (L)

Alteración del tapiz natural con reducción de la fitomasa y cambios en la composición botánica. Localmente pueden aparecer evidencias de grados de erosión leves. Se requieren mejoras sencillas en el ordenamiento del uso. Disminución de la capacidad de carga de hasta 10% de la anterior.

MODERADO (M)

Disminución importante de la cubierta vegetal y/o deterioro de la composición botánica de la pastura; puede existir grave erosión local; reaccionaría a ordenación reforzada por medidas de mejora y conservación. Disminución de la capacidad de carga de hasta 25% de la anterior.

AGUDO (A)

Disminución muy importante de la cubierta vegetal perenne y/o deterioro generalizado de la composición botánica de la pastura; puede existir grave erosión generalizada; se requiere recuperación importante. Disminución de la capacidad de carga entre 25% y 50% de la anterior.

EXTREMO (E)

Denudación extendida de especies perennes y erosión acelerada, generalizada, muy grave; grandes zonas no rehabilitables económicamente. Disminución de la capacidad de carga superior a 50% de la anterior.

El Cuadro N° 3 muestra las combinaciones características de grados de deterioro para cada tipo de alteración del sistema,

CUADRO N° 3 GRADOS DE DETERIORO DEL RECURSO PARA LOS TIPOS IDENTIFICADOS
(estimados para la Misión FAO-PNUMA-UNESCO)

SISTEMA	TIPO DE ALTERACION	GRADO DE DETERIORO		
		Dominante	Asociado	Accesorio
SISTEMA NATURAL	Nt	N	L	M
SISTEMA GANADERO	G ₁	L	L	M
	G ₂	L	M	A
	G ₃	M	M	A
	G ₄	M	A	E
SISTEMA DE CULTIVOS	C ₂	L	L	M
	C ₃	L	M	M
	C ₄	M	L	A
	C ₅	A	M	L
	C ₆	A	E	L/M
N: Nulo	L: Ligero	M: Moderado	A: Agudo	E: Extremo

2.1.3 Extensión y magnitud del deterioro

El Cuadro N° 4 resume los grados de deterioro del recurso tierra para el país, en porcentajes del área total (considerando los grados dominantes y asociados). La Carta N° 1 muestra la extensión territorial de los grados dominantes de deterioro.

CARTA DE TIPOS DE ALTERACION DEL ECOSISTEMA Y GRADOS



CUADRO N° 4 GRADOS DE DETERIORO DEL RECURSO TIERRA EN URUGUAY_
(% del área total)

TIPO	GRADO	NULO	LEVE	MODERADO	AGUDO	EXTREMO
Nt		3,0				
G ₁			37,5			
G ₂			18,0	5,0		
G ₃				12,5		
G ₄				0,8	0,2	
C ₂			2,0			
C ₃			2,5	0,5		
C ₄			2,0	8,0		
C ₅				1,2	4,8	
C ₆					1,5	0,5
TOTALES		3,0	62,0	28,0	6,5	0,5

Del análisis de la Carta 1 y el Cuadro N°4 es posible extraer algunas conclusiones relevantes.

- a. En primer lugar, prácticamente todo el país (97%) está afectado por algún grado de deterioro del recurso tierra. Un 65% de la superficie aún no ha sobrepasado un grado leve de deterioro mientras que un 35% experimenta grados moderados a severos de acuerdo a las pautas utilizadas. Es útil insistir que un grado moderado significaría hasta un 25% de pérdida de la producción anterior en tierras de cultivo, y una disminución de la capacidad de pastoreo de hasta un 25% en tierras de uso pecuario. Para el grado agudo, estos niveles de disminución productiva oscilan entre 25% y 50%.
- b. Las zonas menos afectadas se localizan en las islas, bañados ribereños y principales planicies de los afluentes del Río Uruguay, así como en los Bañados del Este y Sureste del país.

- c. Las regiones bajo uso pastoril, que representan más del 80% del total del territorio, presentan en forma dominante grados leves y moderados de degradación, salvo en el área de Rocha-San Carlos (Sureste) donde se aprecian grados agudos, así como en el litoral Atlántico de dunas costeras.
- d. Los grados leves se corresponden mayoritariamente con los suelos de Basamento Cristalino (zona Centro-Sur), con los suelos del área sedimentaria del Noreste y los suelos profundos de Basalto y lomadas de la cuenca de la Laguna Merín y costa Atlántica.
- e. Los grados moderados se localizan en las zonas correspondientes a los suelos superficiales de Basalto (Norte), suelos superficiales de la zona Cristalina de Rivera (Noreste) y sierras y colinas de la cuenca de la Laguna Merín.
- f. Las regiones con uso agrícola presentan grados más avanzados de degradación concentrándose el área más afectada en las inmediaciones de Montevideo (NE de Canelones) con grados predominantemente moderados y agudos acompañados por grados agudos y extremos en forma localizada.
- g. El litoral agrícola (zona Oeste y Suroeste) presenta grados predominantes leves y moderados asociados a grados agudos en algunas áreas localizadas.
- h. La zona arrocerá de la Laguna Merín presenta grados de degradación predominantemente leves.

2.2 FACTORES CONDICIONANTES

La evidencia empírica disponible parece demostrar que no existe un desequilibrio natural, notorio entre los factores de formación y desarrollo del paisaje que pueda explicar los procesos de degradación de la tierra que han sido detectados en los inventarios anteriormente citados. En condiciones no-perturbadas, todo indica un equilibrio entre el clima, el relieve, los suelos y la vegetación natural, basado en una relación armónica entre esos componentes. No hay evidencia clara de movimientos tectónicos, cambios climáticos, alteraciones en el nivel de base, readaptación de especies u otros fenómenos naturales, suficientemente acelerados, que expliquen los procesos de degradación por causas naturales (FAO-PNUMA-UNESCO, 1983).

El uso de la tierra, en un marco aparentemente estable tampoco aparece como una causa definitoria. El Uruguay no presenta una historia agrícola muy extendida en el tiempo, como la de México, algunas zonas andinas de Sudamérica o Europa, que justifiquen los grados alcanzados y las tendencias del deterioro. Tampoco existe una presión demográfica alta en zonas rurales, como lo indican los datos ya citados. El relieve, por su parte, se puede caracterizar como relativamente suave, con pendientes dominantes entre 3 y 12%, exceptuando un área serrana, de uso pastoril, y planicies ocupadas en su mayor parte por plantaciones de arroz. Los suelos dominantes son Mollisoles y Ver

tisoles, con Alfisoles asociados. El clima es mesotermal, subhúmedo a húmedo, con un total de precipitaciones anuales que fluctúa entre 1000 a 1300 mm. La vegetación natural es de pradera, con un tapiz cerrado. La combinación de estos elementos no aparece como desencadenante de procesos erosivos acelerados. Las causas del fenómeno en definitiva, deben buscarse en un análisis más profundo de las interacciones de algunas formas de intervención antrópica en un marco natural con algunos puntos de fragilidad, dentro de un determinado contexto socio-económico. Este será el tópicico del análisis que sigue.

2.2.1 Del marco físico

2.2.1.1. El clima

Las estimaciones de la erosividad de las lluvias, realizadas en base al índice EI₃₀ (Pannone et al, 1983) indican un rango entre 382 y 779 (en unidades métricas) para los valores de promedios anuales, con una clara tendencia creciente de sur a norte (siguiendo, pero en forma más acentuada, la tendencia de las lluvias). La Carta de Isoerodentas (Fig. N°1) muestra esta distribución y la concordancia con los valores hallados para las vecinas provincias de Argentina (Rojas y Conde, 1980). La erosividad de las lluvias, estimada por este parámetro EI₃₀ para el país, es relativamente alta comparada con áreas del hemisferio norte de similar latitud y total de precipitaciones anuales. Dicho poder erosivo estaría determinado, en gran proporción, por la alta intensidad de algunos eventos.

La distribución estacional de la erosividad es otro factor a tener en cuenta. Los datos para el país indican una concentración durante los meses de primavera y verano. Este régimen se aproxima al que caracteriza climas típicamente subtropicales (Bertoni, et al 1975).

El régimen hídrico, finalmente, es bastante variable. Períodos aleatorios de sequía debilitan el tapiz, y en consecuencia, la protección que este ejerce. Se alternan con otros períodos muy lluviosos y erosivos, lo que agudiza el problema.

El régimen térmico anual provoca fluctuaciones acentuadas en la producción de forraje del tapiz natural, y si la carga anual permanece más o menos constante, es lógico esperar períodos recurrentes de sub y sobreutilización que pueden conducir a degradación.

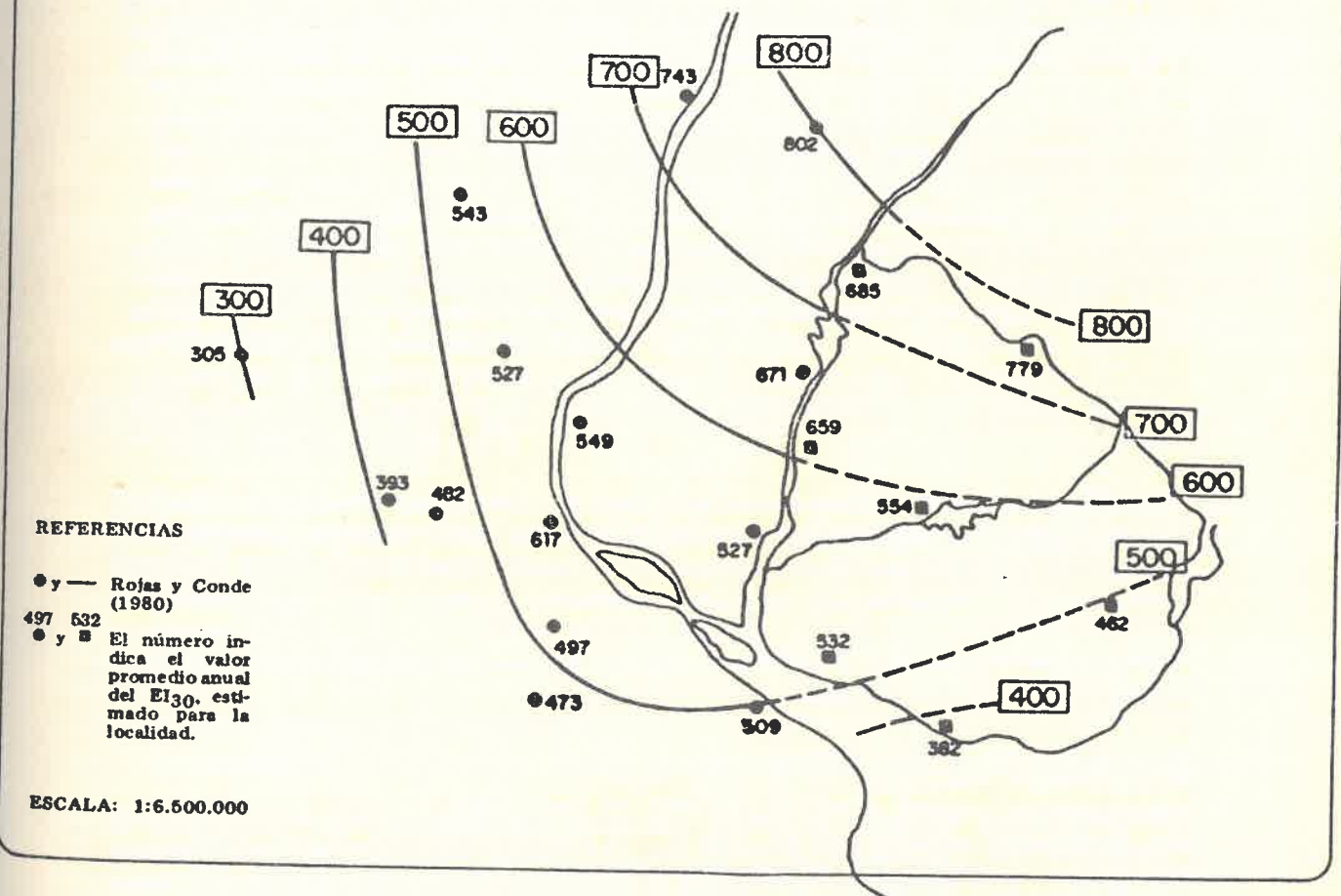
2.2.1.2. Los suelos

Una predominancia de suelos con horizontes superficiales móllicos, ricos en materia orgánica y bien estructurados (Mollisoles y Vertisoles)* podría inducir a pensar en una alta resistencia generalizada frente a los agentes erosivos. Sin embargo, se conjugan una serie de factores

*/ Brunosoles y Vertisoles según la taxonomía uruguaya.

Figura 1

MAPA TENTATIVO DE ISOERODENTAS DE URUGUAY Y PARTE DE ARGENTINA



(de Pannone et al, 1983)

que inciden para que la susceptibilidad sea frecuentemente bastante mayor de la esperada. Estos factores inciden fundamentalmente en la capacidad de aceptación de lluvias del suelo, y por lo tanto, en la generación de escurrimiento, pero algunos también afectan la resistencia a la desagregación y dispersión. Los principales son:

a. Horizontes arcillosos-

Una característica morfológica generalizada en muchos suelos del país es la presencia de horizontes argílicos, con altos contenidos de arcilla y poco permeables. Estos horizontes suelen además localizarse a escasa profundidad, y muchas veces presentan las características que definen un "clay pan". Limitan severamente la capacidad de aceptación de lluvias, y contribuyen a generar escurrimientos superficiales y subsuperficiales. Suelos considerados como profundos se comportan como superficiales desde el punto de vista hidrológico.

b. Las texturas de los horizontes superficiales

Abundan en el país suelos con horizontes superficiales de texturas medias, con altos contenidos de limo y arena muy fina. Estas texturas son particularmente susceptibles a la desagregación por golpeo de la lluvia, particularmente, cuando desciende el contenido de materia orgánica. Por otra parte, estas condiciones son también las que favorecen la generación de costras superficiales. El encostramiento limita la infiltración y favorece la ocurrencia de escurrimientos.

También son abundantes en el país suelos con altos contenidos de arcilla desde la superficie (Vertisoles). Si bien durante períodos secos estos suelos muestran buena infiltración (grietas, buena estructura, etc.), durante los períodos húmedos, cuando está saturados, la infiltración es mínima, y generan altos volúmenes de escurrimiento que muchas veces van a afectar suelos de mayor erodabilidad, situados aguas abajo en la cuenca.

c. Evolución de la fertilidad

La fertilidad natural de buena parte de los suelos del país, particularmente los corrientemente utilizados para cultivos, es relativamente alta. Sin embargo, desciende drásticamente luego de algunos años de cultivos continuo, por disminución del contenido de materia orgánica, degradación de la estructura, etc. Una fertilidad disminuida afecta el riesgo de erosión fundamentalmente en lo que respecta a las dificultades para que se establezca una cobertura vegetal con rapidez y desarrollo suficiente para proteger la superficie del suelo.

d. Materiales subyacentes

La mayor proporción de suelos agrícolas, y muchos de aptitud pastoreo, se desarrollan a partir de materiales madre del tipo loésico (lodolitas). Un manto pleistocénico de origen continental cubre casi todo el territorio, y constituye el principal material generador de suelos del país. Una vez que por erosión laminar o encausada, estos materiales quedan expuestos, el proceso erosivo se acelera, generándose padrones de erosión en cárcavas característicos. Es reconocida la escasa estabilidad de los materiales loésicos frente a los agentes erosivos (Beer y Johnson, 1963; Piest y Ziemnicki, 1979).

Los índices de erodabilidad para los suelos del país, calculados en base al nomograma de Wischmeier (Wischmeier y Smith, 1978) adaptado a las condiciones del medio (Puentes, 1981), muestran una dispersión amplia (de 0.08 a 0.80 para el factor K, en unidades métricas), con un rango más restringido entre 0.15 y 0.30 para los suelos más frecuentemente utilizados en agricultura (Puentes, 1983). Estos valores corresponden a suelos en condición no perturbada (virgen). Una vez que los suelos entran en un ciclo de cultivos, y dependiendo de la longitud y de la intensidad de la historia agrícola, los índices K pueden verse incrementados hasta en más de un 40%.

2.2.2 Del Uso de la Tierra

Algunos elementos que caracterizan los modelos de explotación tradicional del recurso inciden significativamente en los procesos de degradación, y podrían ser considerados como los mecanismos desencadenantes. Merecen destacarse:

i. En la agricultura

a. El monocultivo tradicional

La vegetación natural hoy existente en la mayor parte del territorio es una pradera: comunidad de hierbas de bajo porte (al menos actualmente) con predominio de gramíneas. La cobertura que ejerce este tapiz conjuntamente con las características que imprimen en el perfil del suelo los sistemas radicales de las gramíneas, contribuyen al equilibrio del sistema. Cuando este tapiz es eliminado, y más aún, cuando el suelo pasa a ser utilizado bajo un régimen de cultivos continuos (situación frecuente en muchas regiones) se desencadenan una serie de procesos que contribuyen directamente a agravar los peligros de degradación. Merecen citarse:

- a) eliminación de la cubierta vegetal permanente protectora,
- b) descenso pronunciado en el tenor de materia orgánica,
- c) disminución de la estabilidad estructural,
- d) agotamiento de la fertilidad natural,
- e) perturbaciones periódicas por laboreo,

b. Prácticas de laboreo inadecuadas

El desconocimiento, las tradiciones, los aperos disponibles, etc., son algunos de los factores determinantes de prácticas de laboreo inadecuadas que ejercen una influencia marcada en el fenómeno de la erosión. Algunas de las prácticas con mayor influencia serían:

- a) laboreo excesivo,
- b) laboreo en el sentido de la pendiente,
- c) laboreo de desagües naturales,
- d) meso-microrelieves por laboreo.

ii. En la ganadería

El pastoreo, en general, se realiza en forma más o menos continua y conjunta con ovinos y bovinos. La utilización de reservas de forraje es una práctica escasamente generalizada. Como la proporción entre ambas especies, así como la carga animal total, son menos flexibles que las variaciones estacionales o anuales en la disponibilidad de forraje, el sobrepastoreo es una consecuencia lógica. Un primer efecto es la degradación de la pastura; el segundo, la erosión del suelo.

2.2.3 Del contexto socio-económico

Los mecanismos de intervención desencadenantes actúan sobre el marco natural citado dentro de un determinado contexto socio-económico, que también presenta algunos elementos que catalizan el proceso.

Los más relevantes son:

2.2.3.1 Cultura y educación

No existe en el país una cultura conservacionista adecuada a la realidad del marco físico, en parte, por la transferencia de pautas generales desde regiones con situaciones ecológicas, sociales y económicas diferentes. Por otra parte, y considerando sus objetivos explícitos e implícitos, el sistema educativo actual no aparece como suficientemente efectivo como para generar ese nivel de conciencia conservacionista. Finalmente tanto a nivel de gerente de empresa agropecuaria

como también a nivel técnico, suele considerarse la conservación de los recursos como un fin en sí mismo, desconectado de la conservación de la productividad, ignorando la estrecha relación que existe entre las funciones productivas del sistema y las de mantenimiento y regeneración. Esto conduce a los razonamientos que concluyen "en que la conservación no paga" o en otros tipos de conceptos que obstaculizan la adopción de sistemas de producción conservacionistas que ya están disponibles.

2.2.3.2 Situación económico-financiera del productor y mercados

La situación económica y financiera de los usuarios de la tierra frecuentemente condiciona la adopción de determinados sistemas de producción en los cuales la conservación de los recursos no es un objetivo considerado. Esto es particularmente válido para determinados estratos. Las fluctuaciones aleatorias de los precios, por su parte, que caracterizan el mercado del sector agropecuario, también inciden para que sea difícil la planificación de sistemas de producción conservacionistas, ni siquiera a mediano plazo. En el mercado de tierras, finalmente, el estado de conservación de los predios no se refleja en su real dimensión en los precios.

2.2.3.3 Incentivos

No existe en el país un sistema de estímulos (o desestímulos) que fomente un cambio de actitud por parte del productor con respecto a la conservación del recurso tierra. Ultimamente se han adoptado algunas medidas crediticias, condicionando el crédito oficial a la adopción de ciertas prácticas de conservación. Si bien estas medidas han tenido un impacto mayor al esperado, no se incertan en una política global sobre el uso de la tierra que integre medidas crediticias más amplias, incentivos fiscales, un marco legal reglamentado, etc. Tampoco existe una política agrícola estable que regule, por ejemplo, aspectos tales como la comercialización de la producción, que son básicos para permitir una planificación a nivel predial a mediano o largo plazo.

2.2.3.4 Formas de tenencia

Un alto porcentaje de las tierras no son explotadas por sus propietarios directamente sino bajo regímenes de arrendamiento o medianería. Los medianeros encaran cultivos anuales, por uno o varios ciclos, tratando de obtener una alta rentabilidad inmediata, sin tener en cuenta aspectos de conservación, que no le interesan por su corto horizonte de planificación. Similar postura adoptan los arrendatarios si los contratos no establecen cláusulas al respecto.

2.2.3.5 Tamaño y forma de los predios

En áreas de minifundio, el tamaño de las empresas dificulta la adopción de sistemas de producción conservacionistas. Más que la superficie de los predios, influye la escasa capacidad económico-financiera de las empresas.

La forma de los predios es otro factor que interacciona: son muy comunes en las áreas de minifundio los fraccionamientos excesivamente alargados, y en el sentido de la pendiente, que buscan ofrecer a la vez aguada y salida a caminos a cada hijuela resultante. Esto dificulta la sistematización de chacras.

2.2.3.6 Presión demográfica localizada

Si bien la densidad de población en zonas rurales es baja, existe fuerte presión en áreas aledañas a Montevideo y a algunas capitales departamentales.

2.2.4 Conclusiones sobre factores condicionantes

El nivel de deterioro de la tierra que aparecía como difícil de explicar sobre la base de un análisis superficial del marco físico y de la historia de explotación del recurso en el Uruguay, aparece como un lógico resultado luego de un análisis más profundo de una serie de factores identificados como condicionantes. Seguramente ninguno de los elementos en forma aislada ejerza una influencia suficiente como para explicar la magnitud del proceso de degradación, y las causas deban buscarse en las interacciones (sinergismo) entre todos ellos. Desafortunadamente esto complica el problema y dificulta la búsqueda de soluciones.

2.3 LOS PROCESOS DE DEGRADACIÓN MAS COMUNES

De la amplia gama de procesos de deterioro del recurso tierra en el país, la erosión del suelo ha sido tradicionalmente reconocida como el más amenazante; sin embargo, en los últimos años se ha comenzado a considerar al proceso de degradación de pasturas naturales con mayor detenimiento. Otros procesos, como la disminución de la productividad por un deterioro de las propiedades físicas y químicas del suelo, sin erosión, parecen menos significativos; sin embargo, no deberían descuidarse. Procesos tales como la compactación, la disminución de la fertilidad, el anegamiento, la acidificación, ya han sido detectados y son operativos, al menos localmente. Pero a los efectos del diagnóstico que aquí se pretende, el énfasis se centrará en aquellos dos procesos citados en primer lugar, fundamentalmente por la extensión que ha alcanzado el problema.

2.3.1 La erosión de los suelos

Se conoce bastante acerca del fenómeno de la erosión en el país. Los mecanismos del proceso son universalmente conocidos, y ya han sido listados (2.2) los factores que estarían actuando como desencadenantes para nuestra situación.

2.3.1.1 Erosión en tierras de uso agrícola

En las tierras de uso agrícola, las pérdidas de suelo se aceleran significativamente en cuanto entran en un ciclo de cultivos. El tapiz natural, o bien muchos tapices regenerados por alguna sucesión secundaria, constituyen, en nuestras condiciones, una protección excelente frente al poder erosivo de la lluvia. Pero inmediatamente que esta cobertura es eliminada, por laboreo por ejemplo, la erosión laminar suele alcanzar niveles muy significativos. La alta fertilidad natural de muchos suelos, principalmente de aquellos que han sido tradicionalmente usados en agricultura, unido a los tenores relativamente elevados de materia orgánica, incorporada hasta una buena profundidad en el perfil (carácter iso-húmico de los suelos de pradera) hacen que los efectos de la erosión laminar pasen inadvertidos para el observador no experto. También se la considera frecuentemente como un fenómeno "natural", contra el cual no se puede tomar ninguna medida y que en realidad no genera mayores inconvenientes. La disminución de la productividad del suelo, generada por la erosión laminar, es difícil de evaluar considerando simplemente los rendimientos anuales de los cultivos. Las fluctuaciones año a año pueden ser muy importantes debido a factores climáticos, y estas son las variaciones que el productor percibe corrientemente. La tendencia, gradual pero continua, de una disminución de la productividad natural por erosión es además, en parte, enmascarada por los aumentos en los rendimientos originados por mejoras en la tecnología: nuevas variedades, mejoras en los controles fitosanitarios, una fertilización más eficiente, etc. Sin embargo, y a pesar de estos adelantos tecnológicos, la tendencia ascendente de los rendimientos es muy lenta y en algunos casos inexistente; seguramente, las pérdidas de materiales de los horizontes superficiales por erosión laminar deben ser, al menos, parcialmente responsables.

La tecnología agrícola tradicional adolece de serias carencias, sobre todo en los aspectos relacionados con la preparación de tierras. Ya se citaron las tendencias hacia un laboreo excesivo, que conduce a un extremo afinamiento de los sementeras, y la costumbre de realizar las labores en el sentido de la pendiente y de no respetar los desagües naturales. Muchas de éstas prácticas están fuertemente arraigadas en la tecnología tradicional. Una sementera bien afinada (que la tierra quede "como ceniza") se considera como un objetivo del laboreo secundario, particularmente cuando se siembran semillas finas. En cambio, una chacra "terronuda" se considera mal preparada. Las labo-

res en el sentido de la pendiente, por su parte, también encuentran su justificación en muchos cultivos, y en muchas chacras, para lograr una más rápida evacuación de las aguas pluviales en suelos con una capacidad natural de aceptación de lluvias relativamente baja, y generalmente disminuida por suelas de arado, costras superficiales, etc. Hay que anotar que tanto las suelas como las costras se originan en el laboreo excesivo. Para algunos cultivos, como la remolacha por ejemplo, estos factores interactúan de tal manera que lo convierten en un cultivo en extremo peligroso con la tecnología tradicional, y aún con la "mejorada". La propia semilla monogérmica exigiría un mayor afinado de la cama para lograr una buena implantación. Por otra parte, el desarrollo del tubérculo es sensible a las condiciones de alta humedad. Por lo tanto, laboreo excesivo y en el sentido de la pendiente son prácticas arraigadas, que contribuyen a que las pérdidas por erosión sean altas.

La agricultura tradicional genera pues altas tasas de escurrimiento, que no solo significan una pérdida de agua, como recurso desaprovechado por el cultivo, sino que además implican pérdidas de suelo por erosión laminar. Cuando estos escurrimientos se encausan su poder erosivo se multiplica y la erosión laminar pasa a convertirse en erosión en cárcavas, mucho más evidente.

El encausamiento de los escurrimientos superficiales tiene varios orígenes. En muchos casos, podría ser explicado en base al funcionamiento hidrológico de la cuenca, ya sea considerando un tipo de comportamiento "hortoniano" condicionado por suelos desprotegidos, o bien por la generación de altos volúmenes de escorrentía localizada debida a flujos subsuperficiales y condiciones de saturación en superficie, inducidos por los horizontes B texturales poco permeables. Sin embargo, cualquiera sea el modelo seleccionado para explicar el origen y la evolución de los escurrimientos, seguramente son los factores de manejo del suelo los que actúan de desencadenantes del encausamiento.

Un primer elemento es el laboreo de los desagües naturales. Hasta hace unos pocos años no se realizaba ningún tipo de sistematización de las chacras. Todavía hoy es práctica muy generalizada, y raramente los desagües quedan empastados. Estos desagües, que en condiciones de equilibrio natural (cobertura vegetal y volumen de escurrimiento "normal") están estabilizados, se desestabilizan cuando la cobertura es removida y el volumen del escurrimiento se incrementa por el manejo de la chacra. La aparición de cárcavas en estas condiciones, en general, en forma simultánea, y en líneas a varios niveles de la ladera (sistemas discontinuos) es la consecuencia inmediata. Recién cuando las cárcavas ya están establecidas, el productor evalúa la posibilidad de no arar ese desagüe. Pero ya el proceso de erosión en cárcavas está desencadenado, y el volumen de los escurrimientos que ese desagüe evacúa tiende por lo general a aumentar, por el deterioro creciente de las condiciones hidrológicas de la cuenca de alimentación. El proceso ya no se detiene por el hecho de no arar los bordes, y el sistema va madurando, las cabecezas van remontando y las cárcavas discontinuas se van conectando para

formar un sistema continuo. Es una situación muy frecuente en nuestras tierras agrícolas que todos los desagües naturales estén erosionados por cárcavas.

Otro factor que contribuye al encausamiento de los escurrimientos es el hábito de arar "en la vuelta" y repasar los remates. La arada en la vuelta origina cuatro franjas diagonales que inicialmente quedan sin laboreo pero que finalmente se repasan con el arado, para que no queden áreas "desperdiciadas". Es muy difícil que uno o dos de esos remates no queden con fuerte pendiente. Más aún, frecuentemente algún remate coincide con un desagüe natural. Al ararlos se construye un surco con fuerte pendiente por donde el agua de escurrimiento se encausa e inmediatamente comienza a erosionar. Un padrón de cárcavas siguiendo antiguos remates es otro elemento común del paisaje de las áreas agrícolas.

Un tercer factor que incide en el encausamiento de los escurrimientos son las irregularidades (meso-microrelieve) que aparecen en las chacras por fallas en el laboreo (surcos muertos, no inversión de las aradas, etc.) o por los propios surcos de plantación (cultivos en camellones). El aplanamiento es una práctica de laboreo de escasa difusión. Las irregularidades de la superficie se agudizan año a año: cuando quedan en el sentido de las pendientes encausan los escurrimientos y pueden generar cárcavas.

Una vez que el escurrimiento está encausado, su potencialidad erosiva se multiplica. La erosión en cárcavas es un proceso difícil de desacelerar, más aún de detener. Medidas de control aisladas, localizadas en la propia cárcava (diques, montes de eucaliptus u otros tratamientos en las cabeceras, terrazas de coronamiento, etc) por lo general resultan inefectivas si no se integran entre ellas y con el uso de la tierra en todo la cuenca de alimentación. Entre los mecanismos de avance de cabeceras que se han identificado figuran la erosión "en cascada", los desmoronamientos por pérdidas de cohesión causadas por flujos subsuperficiales, la erosión en túneles ("piping"), etc. Una vez que la altura de las cabeceras y de los taludes laterales adquiere magnitud, y quedan expuestas las lodolitas madres, la erosión en pináculos ("fluting") es otro proceso muy activo de avance.

La erosión en cárcavas en tierras agrícolas puede llegar a constituir un serio impedimento para la sistematización y el laboreo normal de una chacra. Ocasionalmente puede significar, además, una importante proporción de tierra que se quita a la producción y que puede llegar a obligar al abandono del uso agrícola del suelo. Pero aún aquellas áreas que recién estén mostrando procesos incipientes, con surcos de erosión y cárcavas discontinuas, que no tengan mayor significancia desde el punto de vista del área perdida o como impedimento al pasaje de maquinarias, su simple presencia está indicando un estado avanzado de degradación o de desequilibrio del sistema, y el inicio de un proceso prácticamente irreversible.

2.3.1.2 Erosión en tierras de uso pastoril

La erosión del suelo también está afectando tierras dedicadas al pastoreo. En estos casos, el proceso viene precedido, o es simultáneo, al de degradación del tapiz natural, y será tratado en el punto que sigue.

2.3.2 La degradación de las pasturas

El pastoreo es la principal alternativa de uso de la tierra desde el punto de vista del porcentaje de superficie de territorio ocupado. El sistema más difundido es el pastoreo directo, continuo y conjunto de ovinos y bovinos. La curva anual de oferta de forraje muestra agudas oscilaciones, que siguen una marcada tendencia estacional (principales déficits en invierno), aunque por la irregularidad climática (fundamentalmente del régimen de lluvias) puede producirse escasez de forraje en cualquier época del año en forma aleatoria. Esto ya fue indicado como un elemento condicionante de la degradación. Las reservas de forraje están muy escasamente generalizadas. La carga anual total y la proporción ovino/bovino a nivel de establecimiento son menos flexibles que esas variaciones de disponibilidad de alimentos, por lo que se produce sobrepastoreo de la pradera en los períodos de déficit, y subutilización en los de abundancia.

Son varias las vías de degradación que puede seguir la pradera. El sobrepastoreo en períodos de escasez afecta directamente la fisiología de las plantas, reduciendo crecimiento y vigor, tanto de la parte aérea como de las raíces. Por otra parte los períodos de subutilización agudizan las consecuencias desfavorables de la selectividad, particularmente por parte de los ovinos. La persistencia de estos mecanismos de degradación trae como consecuencia la disminución de la frecuencia, y hasta la desaparición de las especies más palatables (especies "decrecientes" de acuerdo al esquema de evaluación de pasturas utilizado corrientemente en U.S.A.). Las especies que son afectadas en primer término son leguminosas. Esto reduce la disponibilidad de nitrógeno para el desarrollo de gramíneas muy productivas*. Paralelamente comienza a aumentar la frecuencia de aquellas especies menos palatables (especies "crecientes") y aparecen especies no climáticas, en general de escaso valor bromatológico (especies "invasoras"). En estadios avanzados de degradación es común el surgimiento de invasoras leñosas, subarborescentes y otras malezas. El resultado final de esta vía de degradación es un tapiz, que si bien conserva un buen porcentaje de cobertura que lo protege de la erosión, presenta una muy baja capacidad de carga y valor forrajero. Otra vía de degradación evoluciona hacia un tapiz donde el porcentaje de cobertura vegetal va disminuyendo, con alta proporción de suelo desnudo en los estadios terminales. La disminución del vigor de las plantas y del área cubierta

*/ Son escasas las referencias bibliográficas sobre degradación de pasturas naturales en el país; al respecto ver CIAAB (1974) por ejemplo.

cónducen un deterioro paralelo de las condiciones edáficas. Es menor el aporte de residuos orgánicos y se deteriora la estructura. Por otra parte, disminuye el porcentaje de intercepción del agua de lluvia por el follaje y aumenta el efecto del golpeteo de las gotas sobre suelo desnudo. Muchos suelos evidencian fuerte tendencia al encostramiento. Consecuentemente aumenta el porcentaje de escurrimiento superficial y pueden surgir problemas graves de erosión en tierras que nunca han sido aradas. Han sido detectados focos graves de procesos erosivos (en cárcavas) en zonas de pasturas naturales. Son necesarios estudios más profundos para discernir si el fenómeno se explica únicamente por problemas de sobrepastoreo, o si están actuando factores desestabilizantes de otro origen. De cualquier manera, cambios drásticos, desfavorables en la composición botánica del tapiz, enmalezamiento, endurecimiento y aumento en el porcentaje de suelo descubierto son todos síntomas detectados de degradación de pasturas.

3. PROGNOSIS Y ALGUNOS CRITERIOS PARA LA IDENTIFICACION DE AREAS PRIORITARIAS

Resulta sumamente complejo establecer una proyección de la posible evolución que podrían seguir los procesos de degradación de las tierras del país ya que las prognosis en esta materia pueden quedar fácilmente invalidadas por cambios en el uso de la tierra, modificaciones en las prácticas de manejo, etc. A los efectos de contribuir a establecer prioridades, interesaría una proyección para el caso de que no se tomen medidas eficaces que modifiquen sustancialmente las actuales tendencias anteriormente mencionadas, es decir, que el uso de la tierra prosiga sobre las bases actuales (a esto lo designamos como una prognosis pre-tratamiento). Pero aún en este caso el pronóstico es difícil ya que la relación entre degradación y tiempo no es necesariamente una recta. Numerosos investigadores han propuesto curvas de forma signoidea para caracterizar tanto la erosión como la degradación de las pasturas*. Una familia de tales curvas aparece en la figura N° 2, mostrando la relación entre grados de deterioro y tiempo para distintas situaciones, incluyendo sistemas de diversa fragilidad y procesos de degradación que evolucionan a distintas tasas. El diagnóstico de la situación de las tierras del país puede ser interpretado en función de esas modalidades de evolución teórica, lo que serviría de guía para estimar las tendencias futuras e identificar áreas específicas que podrían merecer estudios especiales o prioridad en un programa de acción

*/ Al respecto, ver Riquier (1977).

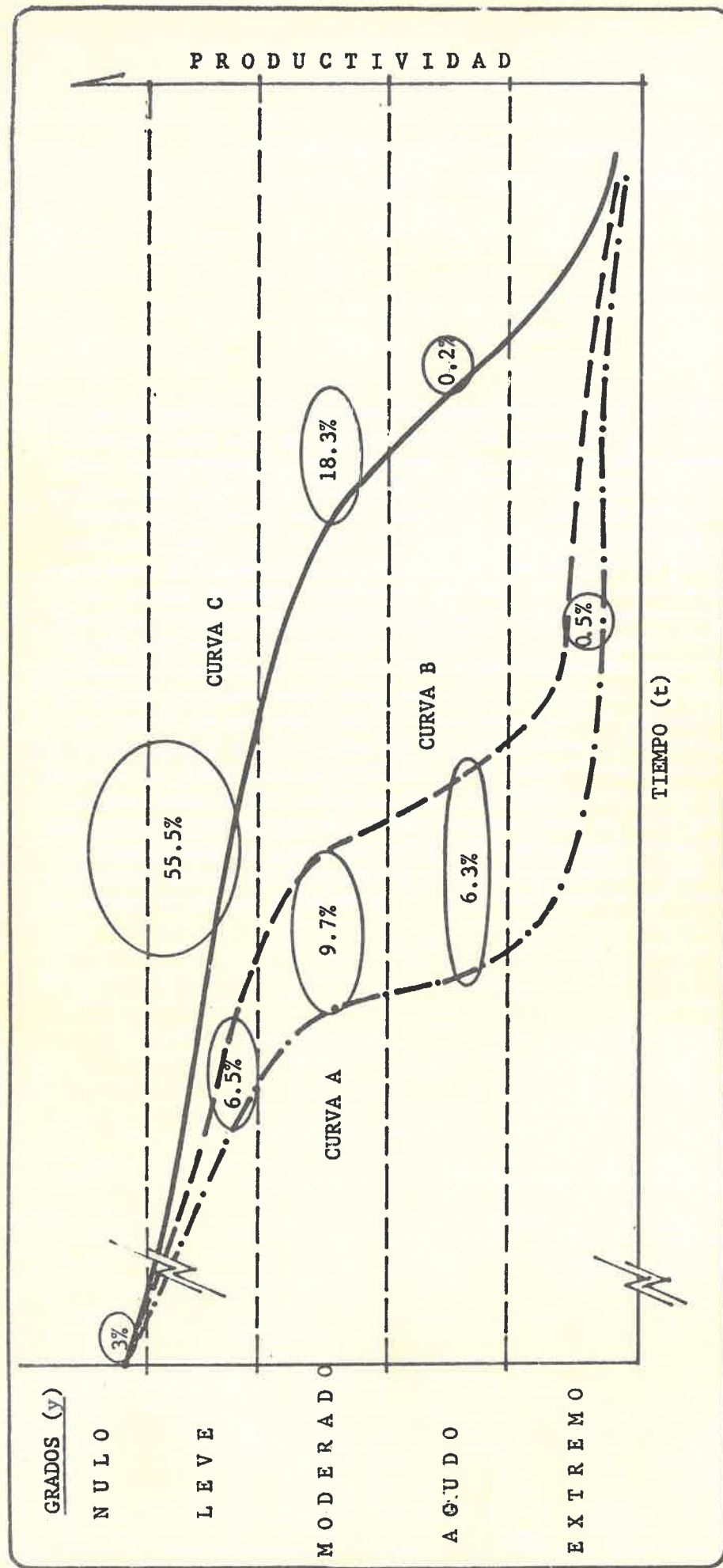


Figura Nº 2: Relación entre grados de deterioro del recurso tierra y tiempo. En abscisas se representan los cinco grados definidos en el diagnóstico; en ordenadas aparece una escala de tiempo no determinada. Las pendientes de las curvas (dy/dt) brinda una idea de la tasa de degradación en ese período. La curva A representa procesos muy acelerados, como los de erosión en tierras muy susceptibles. La curva B indica procesos intermedios, como los de erosión en suelos más resistentes. Finalmente, la curva C representa la evolución de procesos más graduales, como los de degradación de pasturas. En alguna parte de la curva, cercana al límite entre los grados moderado y agudo, se encuentra el umbral de irreversibilidad, o sea el punto superado el cual el sistema pierde su resiliencia. Se indican los porcentajes de tierras que se encuentran en cada uno de los estados.

Un problema particular lo constituyen las tierras con grados agudos de deterioro, que corresponden principalmente a algunas áreas que han soportado un uso agrícola intensivo por períodos prolongados de tiempo (6.3%) (NE de Canelones, por ejemplo). Constituyen un estadio evanzado de un proceso involutivo acelerado que afectó principalmente suelos muy productivos que tenían una buena resistencia frente a los agentes erosivos (correspondería al representado por la curva B). En esta región aparecen también, en forma localizada, algunos focos de degradación extrema (0.5%). Estas tierras han perdido su resiliencia, su capacidad de volver a los niveles productivos originales. Un gran porcentaje está sufriendo procesos de deterioro a tasas aceleradas, muy difíciles de detener. En algunas áreas es posible detectar algunos signos de relativa estabilización, en parte por el abandono de la tierra, o por el pasaje a un uso menos intensivo. Un enmalezamiento generalizado por Cynodon también contribuye a un nuevo equilibrio, pero a un nivel muy bajo de productividad.

Otro problema diferente lo constituye el litoral agrícola, que soporta el grueso de la producción de granos del país, donde predominan grados leves y moderados de deterioro en tierras bajo cultivos extensivos. Esta región tiene una historia agrícola más reciente lo que explica en parte el hecho de que la degradación no haya avanzado tanto como en Canelones y San José, por ejemplo. Aún sería posible desacelerar, detener y hasta revertir el proceso en muchas partes. Sin embargo, el deterioro podrá estar evolucionando a una tasa más rápida como consecuencia de una agricultura altamente mecanizada sobre algunos suelos menos resistentes. Seguramente se llegará a los estadios de degradación aguda en menos tiempo de lo que llevó el proceso en Canelones.

Un 74% del país presenta grados de deterioro leves (55,5%) y moderados (18,3%) en tierras que se están utilizando para pastoreo. La degradación de las pasturas naturales es un proceso que en nuestras condiciones operaría a tasas mucho más lentas que el de la erosión de suelos en tierras de cultivos (curva tipo C). En la mayor parte de estas áreas, fundamentalmente en aquellas con grados leve de deterioro, todavía se estaría a tiempo de introducir modificaciones en el manejo para revertir el proceso. El no hacerlo significaría la generalización (en un plazo difícil de determinar) de tapices degradados por predominio de especies poco palatables (crecientes) y malezas invasoras, y en otros casos, tapices de escasa cobertura y suelos erosionados.

La mayor proporción de este 74% mencionado en último término lo constituyen tierras con vocación pastoril bien marcada. Pero también incluye algunas tierras potencialmente arables como Alfisoles y Ultisoles*, arenosos del NE (Tacuarembó y Rivera) y suelos profundos de lomadas del E (Treinta y Tres y Rocha). Si bien arables, estas tierras son marginales para la agricultura en nuestras condiciones, por su alto riesgo de erosión. Sin embargo, ya han existido intentos en el pasado de expandir

*/ Luvisoles y Acrisoles según la taxonomía uruguaya.

la frontera agrícola hacia estas regiones, fundamentalmente con soja como principal cultivo. Algunos de estos intentos no prosperaron simplemente por una situación de mercado desfavorable. Cuando se evalúa esta alternativa de uso para estas tierras debería considerarse su marginalidad para una agricultura intensiva, y el peligro de que se desencadenen procesos erosivos acelerados (curva tipo A) que podrían culminar en los estadios terminales en pocas décadas, o quizás aún, en pocos años.

4. CONCLUSIONES

La identificación de áreas prioritarias en lo referente a programas de investigación o planes de acción en el terreno debe realizarse previa consideración de los múltiples aspectos del problema, y no es este el objetivo de este trabajo. Simplemente se ha intentado ofrecer un diagnóstico de la situación, identificando qué procesos de degradación son los más significativos, en qué grado han afectado la productividad y qué tendencias podrían seguir en el futuro si no se intenta controlarlos. Si bien son muchos los elementos que inciden, y basta recordar el análisis somero de factores condicionantes del capítulo 2, las conclusiones de este diagnóstico podrían contribuir a una priorización de esfuerzos y de recursos más acertada,

Las diversas situaciones que fueron identificadas, desde tierras con grados de deterioro leve, por métodos de pastoreo inadecuado, a otras con un deterioro agudo por una agricultura irracional, exigen estrategias también diferentes: desde un simple condicionamiento de la tierra hasta una recuperación total. Para algunas de estas estrategias, el país ya cuenta con soluciones tecnológicas aparentemente adecuadas. Para el sector de la agricultura cerealera extensiva, por ejemplo, los sistemas de producción en base a rotaciones cultivos-pasturas, complementados con medidas simples de conservación ofrecen una perspectiva muy interesante*. La investigación debería proseguir en esta área para realizar ajustes del sistema y una mejor cuantificación, pero seguramente, el problema mayor radica en la transferencia y adopción de esos sistemas, ya disponibles, por los productores. En otros tópicos, en cambio, son más evidentes las necesidades de mayor información y es el caso, por ejemplo, de los mecanismos de degradación de pasturas naturales y sus posibilidades de control, así como el de sistemas de rehabilitación de tierras severamente afectadas por erosión. Aquí la investigación nacional tendrá necesariamente que generar esa información.

Finalmente, es necesario tener en cuenta que es difícil que un programa de investigación que cubra únicamente el aspecto tecnológico del problema, aún un programa muy completo, pueda dar una respuesta que sea una verdadera solución, si no está ligado a un programa paralelo de investigación de la influencia del marco socio-económico. Y más aún, sería ilógico esperar que los resultados de los esfuerzos en investigación, aunque cubran todos los aspectos técnicos, económicos, sociales, etc, sean suficientes para desacelerar los procesos de deterioro revisados. Es necesario que los sistemas productivos conservacionistas diseñados en base a esos resultados sean operativos en el terreno, y para ello es necesario eliminar los obstáculos que se oponen a su adopción, y más aún, incentivar activamente esa adopción o desestimular los sistemas irracionales. Esto, en última instancia implica una decisión que debe ser adoptada a nivel político

*/ Ver CIAAB (1980).

5. LITERATURA CITADA

1. BEER, C.E. y H.P. JOHNSON (1963) - Factors in gully growth in deep loess area of Western Iowa. Trans. of ASAE 6(3).
2. BERTONI J., F.LOMBARDI y R. BENATTI (1975) - Equação de perdas do solo Secretaria da Agricultura do Estado de Sao Paulo, Bol.Téc.Nº 21. Instituto Agronómico. Sao Paulo. Brasil.
3. CAYSSIALS R., J. LIESEGANG y J.PIÑEYRUA (1978) - Panorama de la erosión y conservación de los suelos en Uruguay. D.S.-MAP. Bol.Téc.Nº 4 Montevideo.
4. CIAAB (1974) - Manejo de pasturas naturales. MAP-Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerger". E.E. La Estanzuela, Bol. de Divulgación Nº 28. Colonia.
5. CIAAB (1980) - Rotaciones. CIAAB-MAP. Miscelánea Nº 24. E.E. La Estanzuela. Colonia.
6. FAO (1967) - Anuario de Producción. Roma.
7. FAO-PNUMA-UNESCO (1983) - La situación de desertificación en Uruguay, Dessertification Planning Mission. Informe interno, Febrero-Marzo 1983. Montevideo.
8. PANNONE J., F. GARCIA y L. ROVIRA (1983) - Indice de erosividad de lluvias en Uruguay. Plan Preliminar de Colaboración Recíproca en Conservación de Tierras y Aguas en el Uruguay. MAP-IICA-INC, Montevideo.
9. PIEST R.F. y S.ZIEMNICKI (1979) - Comparative erosion rates of loess soils in Poland and Iowa. Trans. of ASAE 22(4):822-833.
10. PUENTES R. (1981) - A framework for the use of the Universal Soil Loss Equation in Uruguay. M.Sc. Thesis. Texas A&M University. College St. Texas - USA.
11. PUENTES R. (1983) - Una metodología para evaluar la capacidad de uso de de las tierras: primeros resultados. Plan Preliminar de Colaboración Recíproca en Conservación de Tierras y Aguas en el Uruguay. MAP-IICA-INC - Montevideo.
12. RECA L. y M. REGUNAGA (1978) - Costo de insumos en el Sector Agropecuario. Informe al MAP.

13. RIQUIER J. (1977) - Philosophy of the world assessment of soil degradation. En: Assessing soil degradation. FAO Soil Bull. N° 34. Roma.
14. ROJAS A.C. y A.A. CONDE (1980) - Determinación del índice de erosividad de las lluvias (segunda aproximación). IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Paraná, Argentina.
15. VISCHER S.S. (1955) - Comparative agricultural potentials of the world's regions. Econ. Geog. 31: 82-86.
16. WISCHMEIER W. y S.B. SMITH (1978) - Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agr. Handbook N° 537, USDA. Washington D.C. --U.S.A.

RP/jp
Nov. 1983.

APENDICE I

TIPOLOGIA DE LA DEGRADACION*

- Sistemas naturales**

TIPO:

N₁ La fauna nativa ha sido perturbada en algún grado, o hasta destruída. La vegetación natural también ha sido afectada, pero en grado leve o por acciones localizadas, pero en general se ha perdido fitomasa en forma significativa. El suelo no ha sido alterado mayormente.

- Sistemas ganaderos

TIPO:

G₁ La vegetación natural ha sido alterada en forma significativa, traduciéndose en reducción de fitomasa y alteración de la composición botánica. Este último proceso se traduce fundamentalmente en la disminución de la frecuencia de especies apetecibles y de mayor potencial productivo. El suelo, en cambio no evidencia alteraciones de importancia.

G₂ Las alteraciones en la vegetación natural, disminución de fitomasa y alteración de la composición florística, son relevantes, fundamentalmente en este último elemento. La disminución de las especies apetecibles es significativa y se correlaciona con aumento de frecuencia de especies posiblemente climáticas menos valiosas (increasers) e invasoras, algunas de ellas consideradas como malezas. El suelo, en cambio no parece haber sufrido alteraciones de importancia. Se puede registrar algún grado de degradación leve, en propiedades físicas fundamentalmente, pero sin pérdidas por erosión.

G₃ Las alteraciones en la vegetación natural aparecen como significativas.

En cuanto a alteraciones en la composición botánica, las especies menos deseables -climáticas e invasoras- ocupan una importante proporción del tapiz, pudiendo llegar a predominar. En otros casos, la alteración surge de la disminución de la fitomasa, que puede llegar al grado de aparición de ciertos porcentajes de suelo desnudo.

*/ En base a la utilizada por la misión FAO-PNUMA-UNESCO(1983).

**/ Se consideran sistemas "naturales", para las condiciones del Uruguay, aún aquellos en donde el hombre ha intervenido afectando la fauna. En el trabajo original de FAO-PNUMA-UNESCO(1983) se identifican tres "tipos" dentro de los sistemas naturales; aquí se les considera conjuntamente en uno solo.

El suelo presenta algunos síntomas claros de degradación incipiente en sus propiedades físico-químicas. Además, existen evidencias de pérdidas de suelo por erosión, fundamentalmente laminar. Pueden existir algunas cárcavas pero no constituyen un elemento característico del sistema.

- G₄ Las alteraciones en la vegetación natural, reducción de fitomasa o cambios en la composición florística, son similares a las del tipo G₃.

Las evidencias de degradación de las propiedades físico-químicas del suelo son más claras que en los tipos anteriores (generalmente se traducen en disminución de las tasas de infiltración y aumento de los escurrimientos). La presencia de cárcavas en estado activo es una característica típica del paisaje.

- Sistemas de cultivos

TIPO:

- C₂ El tapiz natural ha sido eliminado por roturación. El suelo presenta alteraciones leves en sus propiedades físico-químicas, fundamentalmente reducción en el contenido de materia orgánica. Las pérdidas de suelo por erosión no son significativas.
- C₃ El tapiz natural ha sido eliminado por roturación. El suelo presenta perturbaciones significativas en las propiedades físico-químicas: disminución drástica en los contenidos de materia orgánica y hasta pérdida total de la estructura. Sin embargo, las pérdidas de suelo no son significativas debido a que las pendientes son mínimas o nulas.
- C₄ El tapiz natural ha sido eliminado por roturación. El suelo muestra evidencias de degradación en sus propiedades físico-químicas y pérdidas significativas por erosión, fundamentalmente del tipo laminar. Pueden existir cárcavas pero ocupando una proporción baja de la superficie (<2%).
- C₅ El tapiz natural ha sido eliminado por roturación. El suelo puede permanecer desprotegido por períodos prolongados o cubierto por especies agresivas pero poco productivas (Cynodon por ejemplo). Las alteraciones en las propiedades físico-químicas de los suelos son muy significativas desde el punto de vista de la productividad (disminución drástica de la materia orgánica, pérdida de la estabilidad estructural, compactación, problemas de suelos o costras, disminución de la fertilidad natural, etc). Las pérdidas de suelo son significativas tanto por erosión laminar, surcos o cárcavas, aunque la proporción de éstas últimas no ocupa proporciones muy significativas, del paisaje (<5%).

- C₆ El tapiz natural ha sido eliminado por roturación. La superficie frecuentemente permanece desprotegida por ausencia de cubierta vegetal, o bien cubierta por especies agresivas, poco productivas. Las alteraciones que han sufrido el suelo son extremas, tanto en sus propiedades físico-químicas como en las pérdidas sufridas. Los procesos son los enumerados para el tipo C₅. La magnitud de las pérdidas por erosión es aún más acentuada. Aparecen suelos truncados y las áreas ocupadas por cárcavas son superiores al 5%.

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

PROBLEMAS HIDROLOGICOS Y DE EROSION EN
LAS CUENCAS HIDROELECTRICAS

Acad. Ing. Roberto Maisonnave

Montevideo-Uruguay

R E S U M E N

Se destaca la importancia de determinar los coeficientes de escurrecimiento de las precipitaciones pluviales, para el aprovechamiento óptimo del recurso de agua con el fin específico y para la protección de obras y propiedades en las riberas agua abajo de las presas.

Deterioro de la eficiencia de las inversiones para aprovechamiento y protección, derivada de los efectos de la erosión sobre los suelos de la Cuenca.

Importancia de la medición y predicción de tendencias como elemento de decisión en la planificación de políticas de conservación de recursos.

Compatibilización con usos agrícolas intensivos del agua en las cuencas hidroeléctricas.

1. INTRODUCCION

El Río Negro nace en territorio brasileño y corre por el centro del país dividiéndolo en dos partes.

Sobre este río se encuentran tres aprovechamientos hidroeléctricos con una cuenca total de 63.000 km², de los cuales 60.000 están en nuestro propio territorio y solamente 3.000 en territorio brasileño.

Aparte de los aprovechamientos señalados, el de Salto Grande, compartido con la Argentina, se encuentra sobre el Río Uruguay, límite. Su cuenca es en su mayor parte, brasileña y argentina.

En lo que va del año 1983, los tres aprovechamientos escalonados del Río Negro: "Gabriel Terra" en Rincón del Bonete; "Baygorria" y "9 de Febrero de 1973" en Paso del Palmar, contribuyeron con 68,16% de la energía eléctrica total generada en el país. Salto Grande, sobre el Río Uruguay, contribuyó con 26,15%. En total, representan el 94,31% en el mismo concepto.

Si se tuviera que generar esa energía por centrales térmicas convencionales, sería necesario quemar unos 175.000.000,00 de dólares estadounidenses por año, de los cuales unos 120.000.000,00 corresponden a los aprovechamientos del Río Negro.

Estas obras constituyen la única fuente de energía desarrollada y explotada comercialmente en nuestro país. Solamente otra fuente de energía nacional tiene cierta importancia relativa: la leña, pero casi no se la explota comercialmente.

En lo que sigue trataré de identificar los problemas que, en mi concepto, se vinculan al tema del presente Taller, teniendo en cuenta la importancia de la hidroelectricidad como fuente de energía en el presente y en el futuro del país.

2. PROBLEMAS HIDROLOGICOS.

El aprovechamiento del agua, regularización del caudal.

La producción de energía en un aprovechamiento hidroeléctrico es proporcional al salto y al caudal utilizado.

El primer factor depende de condiciones topográficas dentro de límites bastante estrechos.

El problema se centra entonces en el manejo del caudal natural para obtener la máxima energía posible.

Limitaciones técnicas y económicas fijan la potencia instalable en un aprovechamiento dado y, por tanto, el caudal instantáneo máximo admisible por los equipos generadores.

El caudal natural, es en general, irregular y muy variable. Así en nuestro Río Negro, en el primer escalón se tiene una media anual de $17,2 \text{ km}^3$ con un máximo registrado de $47,8 \text{ km}^3$ en 1914 y un mínimo de $0,43 \text{ km}^3$ en 1945. La desviación típica del caudal anual es $9,375 \text{ km}^3$.

Para obtener una utilización razonable del caudal medio anual en estas condiciones, es necesario realizar embalses muy importantes, cuyo volumen alcanza el 52% del caudal medio anual en el caso de Gabriel Terra.

Se puede así garantizar el suministro indispensable de energía, si se complementan las instalaciones hidroeléctricas con un cierto respaldo de energía térmica. Esto es necesario, pues es antieconómico y aún físicamente imposible construir embalses más grandes.

Características del caudal. Crecientes.

La precipitación pluvial en la cuenca vertiente del aprovechamiento, genera el caudal. Con cada lluvia se produce una crecida de aumento rápido en los primeros días, seguido de un agotamiento progresivamente más lento y virtualmente asintótico, hasta la próxima tormenta.

La mayor parte del caudal está concentrado en la crecida inicial y es debido al escurrimiento superficial de una parte de la precipitación. Pero otra parte, no despreciable, se debe al agotamiento de las aguas freáticas originadas en la infiltración hacia el subsuelo de parte de la lluvia. Esta última parte del caudal corresponde al período asintótico del hidrograma de cada lluvia. Es bastante regular, de modo que el sub-suelo de la cuenca vertiente actúa como un embalse regulador natural.

La parte inicial del hidrograma derivado de una lluvia, origina una crecienta. En ciertos casos, una sucesión de tormentas o episodios lluviosos intensos, originan crecientes de magnitud muy importante, tanto en intensidad máxima como en volumen total.

Efectos y manejo de las crecientes.

Estas crecientes deben pasar por las obras del aprovechamiento sin causar daños a las mismas y haciendo mínimos los perjuicios agua abajo.

Con ese fin, se dota a las obras de un aliviadero o vertedero capaz de derivar y controlar las crecientes sin experimentar deterioro.

Los efectos potenciales de las crecientes son ciertamente muy graves, tanto en las propias obras del aprovechamiento como en las riberas del cauce agua abajo.

Para limitar los costos y también los daños a la propiedad, construcciones y poblaciones ribereñas agua abajo de las presas, se manejan las crecientes de modo de "laminarlas". Es decir, se almacenan parcialmente en el embalse, en un volumen adicional previsto al efecto. Se logra así disminuir el caudal instantáneo de punta del hidrograma de la crecienta, distribuyéndolo en un caudal menor y uniforme durante varios días.

A título de referencia, la crecienta máxima registrada en 1959 en el perfil de Rincón del Bonete alcanzó $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Fue laminada por la presa y vertedero a unos $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$, incluida la derivación abierta en la emergencia por voladura de un dique lateral.

En este episodio se produjo el desborde de la Presa y la inundación de la Central Eléctrica por insuficiencia del volumen reservado para laminación de crecientes en la etapa en que se encontraba la obra en esa época.

Trabajos complementarios realizados en 1963 llevaron la capacidad controlada de laminación hasta crecidas de $19.000 \text{ m}^3/\text{s}$, con un caudal máximo pasante agua abajo de $7.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

El manejo de los caudales implica el dilema de mantener agua almacenada en un momento determinado, en previsión de un futuro período seco, o utilizarla creando así las condiciones para almacenar futuros aportes.

En el caso de una crecienta, se debe siempre tratar de hacer mínimos los perjuicios agua abajo, laminándola al valor de caudal mínimo posible. Pero ello implica mantener ocupado, en parte, el volumen reservado para manejo de crecientes. Se arriesgan las posibilidades de laminación de una crecienta sucesiva que puede sobrevenir en un intervalo de tiempo aleatorio, a veces muy breve.

Predicción de caudales y crecientes.

Aparte de las decisiones sobre la operación de los embalses y vertederos, la predicción de los caudales y crecientes permitirá alertar, mediante avisos apropiados, a los pobladores y propietarios ribereños de los cauces afectados. Estos podrán tomar medidas anticipadas en salvaguarda de sus vidas e intereses.

Esas mismas predicciones orientarán decisiones de autoridades competentes sobre eventuales evacuaciones de pobladores y bienes en las zonas inundables.

Se desprende como conclusión, la necesidad de efectuar una predicción lo más acertada posible.

El procedimiento consiste, en el caso del Río Negro, en determinar diariamente, mediante una red de 231 pluviómetros, la lluvia caída en la cuenca vertiente de los embalses, que cubre una extensión de 62.946 km².

Se procede por sub-cuencas y se aplican "coeficientes de escurrimiento" basados en datos estadísticos para estimar la proporción de lluvia caída que llegará como creciente al embalse o al perfil del cauce, objeto de la predicción.

Pero esos datos estadísticos, tienen desviaciones muy importantes, entre 0% y 5% en verano y entre 40% y 80% en invierno. Resulta así una especie de ejercicio de adivinanza por parte del operador. En efecto, son demasiados y poco conocidos los factores que influyen en el valor real del coeficiente.

Ello resta precisión al pronóstico, obligando a mayor cautela en el manejo, lo cual siempre se traducirá en una cierta pérdida de eficiencia.

La determinación de coeficientes de escurrimiento.

Si el uso de valores estadísticos y criterios subjetivos para fijar el valor de los coeficientes a emplear en cada episodio de lluvias, pudiera sustituirse por una determinación más precisa y confiable, mejoraría considerablemente la calidad, certeza y utilidad de los pronósticos de caudales y crecidas.

Los factores que parecen afectar la cuantía de la escorrentía superficial de las precipitaciones pluviales, en una parcela determinada, comprenderían:

- a) las características de la precipitación: fundamentalmente su intensidad y duración;

- b) el estado y clase de la cubierta vegetal cuando ésta existe o el estado de la superficie, en caso contrario;
- c) el contenido de humedad en la capa superficial y, en menor grado, en el subsuelo.

Los factores que a su vez pueden afectar b) o c), comprenden desde el viento, la insolación, la temperatura y la humedad atmosférica en días anteriores, hasta el tiempo transcurrido desde lluvias anteriores y la intensidad y duración de éstas.

Algunos de estos factores pueden determinarse o registrarse con cierta facilidad, pero la mayoría no es fácilmente medible o registrable en la escala y para el área de interés (231 estaciones pluviométricas y 63.000 km²).

Por otra parte, las relaciones entre esos factores y los coeficientes buscados, podrían ser logrados por medio de mediciones en las cuencas experimentales. Me atrevo a suponer que sea posible la determinación directa de esos valores con un grado de precisión y certeza muy superior al que permite la técnica aplicada actualmente.

3. PROBLEMAS VINCULADOS A LA CONSERVACION DEL SUELO.

Aunque en definitiva algunos de estos problemas se traducen finalmente por consecuencias de carácter hidrológico, los mencionaré bajo este rótulo por su origen indudable.

Efectos del estado del suelo sobre las escorrentías.

Ya mencioné el efecto de las escorrentías superficiales en la génesis de las crecientes y el de las aguas infiltradas en el subsuelo en la regularización de los caudales en los períodos transcurridos entre crecidas.

Ambos elementos del caudal resultan fuertemente influenciados por el estado del suelo y, como consecuencia, por la conservación del mismo.

Cuanto mayores y más intensas sean las crecidas, mayores serán los daños e inconvenientes que originen.

También serán mayores las inversiones necesarias para manejar esas crecientes en las obras de aprovechamiento hidroeléctrico.

Así, en un embalse dado, será mayor el volumen necesario para la "lamina-ción" y por tanto, mayor el costo. En otros casos, cuando el volumen máximo

del embalse está limitado por razones topográficas o se trata de un embalse ya construido, el volumen adicional necesario para laminar las crecidas se logrará a expensas del utilizable para regularización del caudal. Consecuente y sucesivamente disminuirán el caudal aprovechable, la energía generada y la eficiencia económica de las inversiones.

Para una tormenta o episodio lluvioso determinado, el escurrimiento superficial generador de la crecida será más intenso y mayor en suelos poco permeables, escasos en cubierta vegetal o mal acondicionados por laboreo erróneo, es decir, por falta de manejo conservacionista en general.

De una manera similar, la infiltración en una precipitación determinada será menor. Con ello aumentará el caudal de crecida y disminuirá el caudal de agotamiento de las capas freáticas.

Ambos efectos resultan adversos para la eficiencia de las inversiones hidroeléctricas y para la protección contra los perjuicios causados por las crecientes.

La importancia de estos factores en el momento de tomar decisiones, sea en etapa de proyecto, sea en la política de operación frente a situaciones aleatorias esbozadas en el capítulo anterior, hace sumamente interesante la determinación más exacta posible de los factores intervinientes. Se observa que es necesario basarse en valores estadísticos, históricos, incluso en lo referente a tendencias. La medición y determinación de los factores que puedan alterar tendencias respecto de las inferidas a partir de la estadística, permitirán mejorar el diseño de las políticas de operación al disminuir el contenido aleatorio de los riesgos a enfrentar.

Podemos suponer que las inversiones de conservación de suelo y el manejo racional tendiente al mismo fin, resultarán orientados y regulados por la medición o determinación de sus efectos por las cuencas experimentales. Ello alentará e impulsará esas prácticas e inversiones, eliminando incertidumbre, tanteos, acciones a ciegas, siempre poco eficientes, tanto si resultan insuficientes como si son excesivas.

Se lograrán así beneficios indirectos al mejorar las características del escurrimiento y, como explicaré más adelante, al disminuir los deterioros y perjuicios potenciales de los arrastres de sólidos originados en la erosión.

Al referirme antes a la génesis del caudal a partir de una lluvia determinada, podía distinguirse el escurrimiento superficial generador de la crecida y el agotamiento de la capa freática alimentada o recargada por la infiltración profunda en el subsuelo de cierta parte de esa lluvia.

En términos generales, resulta aparente la desventaja que para la regulación de crecidas y la regularización del caudal presentan los suelos erosionados o no manejados con prácticas conservacionistas.

Las cuencas experimentales permitirían confirmar y cuantificar estas conjeturas. Por ende, orientar esfuerzos o inversiones.

Problemas vinculados a los procesos erosivos.

En esos procesos, cada avenida, cada creciente, lixivia material sólido de la superficie del suelo. Por lo menos una parte de este material permanece en suspensión hasta alcanzar cauces más o menos importantes.

En los cauces, una parte de los sólidos es arrastrada como caudal sólido o depositado formando bancos o capas aluviales en las riberas. Otra parte continúa en las aguas hasta que la velocidad de éstas permite su decantación.

Se pueden distinguir los efectos de los arrastres en ambos casos.

Los arrastres sólidos depositados en los cauces y en las planicies de inundación de las riberas, producen la modificación de los niveles y pendientes de los mismos.

Los cauces se elevan, las inundaciones alcanzan progresivamente niveles más altos. Los movimientos de los bancos conducen a la progresiva "meandrarización" del cauce y con ello disminuye la pendiente. La menor pendiente causa menor velocidad del agua, favorece mayor decantación de sólidos y las aguas alcanzan niveles y extensiones de inundación cada vez mayores para compensar la falta de pendiente del cauce. Se comprende que si bien el efecto es muy lento, también es progresivo.

4. PROBLEMA VINCULADO A LA CONSERVACION DEL AGUA.

Finalmente, en una cuenca con un desarrollo hidroeléctrico importante, como es el caso del Río Negro, pueden entrar en conflicto los usos consuntivos del agua con la generación hidroeléctrica.

Si el consumo se produce agua abajo de los aprovechamientos, la energía potencial del agua podrá utilizarse ya que deberá pasar por los diversos aprovechamientos. En caso contrario, puede restarse de los caudales que entrarían a los embalses para su regularización y posterior utilización.

Sin embargo, es concebible la compatibilización de tales usos consuntivos, constituidos fundamentalmente por el riego, ya que el consumo como agua potable es insignificante en nuestro territorio, frente a los caudales involucrados.

Esa compatibilización, podría estudiarse y determinarse en cuencas experimentales. El caso concreto correspondería a los proyectos y tendencias de desarrollo de cultivo del arroz en la cuenca superior del Río Negro.

RM/jhi

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

A SURVEY OF EXPERIMENTAL WATERSHEDS IN THE USA

Prof. Richard H. Hawkins

Montevideo-Uruguay

RESEARCH ORIENTED WORKSHOP ON EXPERIMENTAL WATERSHEDS

U.S. -- Uruguay Bilateral Cooperation

A SURVEY OF EXPERIMENTAL WATERSHEDS

IN THE USA

by

Richard H. Hawkins
Professor, Watershed Science Unit
(Department of Forest Resources) and
Professor, Department of Civil
and Environmental Engineering
Utah State University
Logan, Utah 84322 U.S.A.

Abstract

A partial census, estimated to contain data on 75% of the past and existing experimental watersheds in the U.S.A., is described. The data is analyzed and interpreted in light of the U.S. experience. A historical sequence of watershed installation and termination is described. Statistics on watershed locations, sizes, durations, cover types, and research intentions are given, and broken down by agency. It is estimated that about 330 experimental watersheds are currently in operation covering about 480,000 ha (1.2 million acres), or .05% of the U.S. land area.

1. INTRODUCTION

In order to give perspective and background on the American experience with experimental watersheds and thus to offer guidance for Uruguayan efforts, a survey of American experimental watersheds was undertaken. The necessity for this became apparent when preliminary inquiry found no suitable existing document tabulating experimental watersheds, although there are several predecessor works dwelling on special surveys for specific ends, and at least one (1) agency summary. This summary covers any source made available, and though incomplete, it attempts to represent the U.S. situation.

1.1 Definition: No clear definition of "experimental watershed" is offered here. Instead, a concept with attributes is suggested. Candidate information was judged in light of the attributes, with generous portions of personal judgement. An experimental watershed ideally contains the following characteristics:

1. Established and operated for research and scientific purposes, to determine the effects of land use and condition (and changes thereof) and changes of input. Scientific study and understanding of hydrologic processes should be a major goal.
2. Instrumentation includes at least precipitation and runoff, accompanied by some degree of concern for the quality of the data.
3. The watershed should be "small". Admittedly, this requirement lacks precision. Furthermore, the watershed should be a naturally defined geomorphic unit, and thus not a "plot". This requirement is intended to insure areal homogeneity, administrative control, and uniformity of land treatment or condition.

In the work done here, experimental watershed were generally operated by research oriented organizations. This is almost a de-facto definition. Except in a few obvious cases, no candidates submitted were denied inclusion.

1.2 Methods: A large collection of information on past and currently operating experimental watersheds was assembled by several means. First, previous works, reports etc. were opportunistically scanned for possible candidates. Second, inquiry was made to several agencies (U.S.D.A., Agricultural Research Service; U.S.D.A. Forest Service; U.S.D.I., Geological Survey; and Tennessee Valley Authority) for nominees and previous listings. Third, personal knowledge and personal inquiry was used to add to the above resources.

Data was tabulated on computer file with back-up card information on the data source and explanatory notes. The watersheds are characterized by the following attributes

1. Agency or operating organization
2. Location (closest geographic locale)
3. State
4. Name--primary and sub descriptor
5. Area in hectares

6. Elevation (mean) in meters
7. Dates of operation, inclusive years
8. Cover or land type, in brief descriptive terms
9. Purpose of the research, in brief descriptive terms
10. Special notations

A computer program to service this data was written to allow editing, data addition, sorting, searching, printing, and the formation of subfiles. The data assembly contains 886 small watershed entries, and is given as an Appendix.

2. CHARACTERISTICS OF DATA

2.1 General: The collection of 886 watersheds will be hereinafter simply called the "Workfile." It is only a sample of the experimental watershed population known to exist. Based on known omissions and the level of effort devoted, a complete tally might be estimated to contain about 1200 entries. Thus the Workfile contains about 3/4 of the represented population. Known omissions include candidates from several source agencies, and major inputs from the university community.

2.2 Quality: As shall be seen, not only is the Workfile a sample, it is also incomplete. Some individual data entries are missing (indicated in the printout by "?"). Furthermore, occasional entries are suspicious, or had been estimated by approximate means from the information available. An example of this is the estimation of mean watershed elevation on the basis of maximum and minimum elevation.

However, although the file is flawed as described, it is probably representative. Many of the general conclusions drawn from it confirm previous or intuitive notions, thus offering support for some of the deeper derivations taken from it. Table 1 described the general data situation and missing items. In it, "subfiles" contain adequate information on the attribute described. For example, the "Area" subfile consisted of the 867 records with the watershed area shown.

Table 1
Data Characteristics

Item	# Missing	File Size
1. Workfile	--	886
2. Subfiles:		
A. Area	19	867
B. Elevation	605	277
C. Dates	105	781
D. Cover	45	841
E. Purpose	71	815
F. Area, Dates, Cover or Purpose	173	713

A graphical presentation of this is given in Figure 1

NUMBER OF EXPERIMENTAL WATERSHEDS

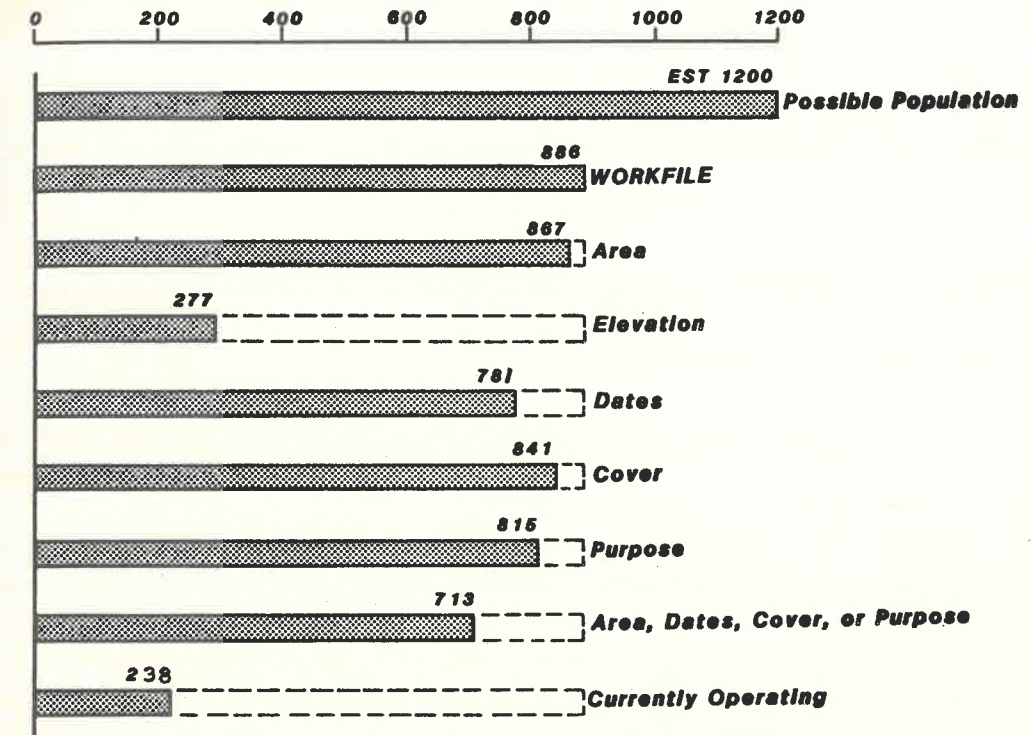


Figure 1. Characteristics of the experimental Watershed Workfile and subfiles

3. DATA ANALYSIS

Given the assembly of watershed characteristics in computer format, the file was analyzed for groupings, trends, and general structure. These are described and discussed in the following

3.1 Agency: The breakdown of experimental watersheds by organizations is given in Table 2. The obvious categories were

1. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service (ARS), and its predecessor agencies.
2. U.S. Department of Agriculture (USFS), Forest Service
3. U.S. Department of Interior, Geological Survey (USGS)
4. Tennessee Valley Authority (TVA)
5. "Others," consisting of all organizations not in the above groupings. There was no predominating group within this subset.

The majority of the installations have been (and are) maintained by either the ARS or Forest Service. Between them they comprise 88 percent of the total, and establishes these two agencies as the major participants in experimental watershed research.

Note that there are 238 in the PR (presently in operation) category, and the contrast between ARS and USFS in totals and presently operating.

Table 2

EXPERIMENTAL WATERSHEDS
BY AGENCIES

Agency	Total	STATUS		
		PR	?	Closed
ARS	545	91	4	450
USFS	235	128	55	48
USGS	34	11	20	3
TVA	42	4	2	36
OTHER	30	4	11	15
TOTAL	886	238	92	556
	100%	26.9%	10.4%	62.8%

Locations: The experimental watersheds are found in 42 of the 50 states. Table 3 gives a breakdown by State and agency. There is a vague clustering of agencies with states. The Forest Service watersheds show some tendency to concentrate in western states and the ARS watersheds in agricultural states. The most surprising entry in Table 3 is for Texas. The 72 watersheds place it first on this category, and they are all ARS operated. There are apparently no experimental watersheds in Maine, Connecticut, Rhode Island, Massachusetts, Delaware, New Jersey, Louisiana, or North Dakota. There is great heterogeneity in their placement, and variation from the national average of about 18 per state. New England seems especially poorly represented. Other states with large numbers of experimental watersheds are Arizona (71), Oklahoma (67), Idaho (63), and Ohio (55).

Table 3

Experimental Watersheds by States and Agencies

STATE	ARS	FS	GS	TVA	OTH	TOT
Alabama	1	0	2	14	0	17
Alaska	0	1	0	0	0	1
Arizona	24	44	2	0	1	71
Arkansas	6	25	0	0	0	31
California	17	19	0	0	3	39
Colorado	4	10	3	0	0	17
Florida	3	0	0	0	0	3
Georgia	18	0	0	0	3	21
Hawaii	3	0	0	0	0	3
Idaho	23	38	0	0	2	63
Illinois	25	0	2	0	2	29
Indiana	20	0	1	0	0	21

Table 3 (Continued)

Experimental Watersheds by States and Agencies

STATE	ARS	FS	GS	TVA	OTH	TOT
Kansas	2	0	0	0	0	2
Kentucky	0	0	4	0	0	4
Maryland	12	0	1	0	0	13
Michigan	3	0	0	0	0	3
Minnesota	0	8	0	0	0	8
Mississippi	13	2	0	0	0	15
Missouri	10	0	0	0	0	10
Nebraska	29	0	0	0	0	29
Nevada	0	0	0	0	1	1
New Hampshire	0	9	0	0	0	9
New Jersey	3	0	0	0	0	3
New Mexico	21	1	0	0	0	22
New York	4	0	0	0	0	4
North Carolina	9	24	0	5	0	38
Ohio	54	0	1	0	0	55
Oklahoma	67	0	0	0	0	67
Oregon	4	15	0	0	3	22
Pennsylvania	1	0	2	0	6	9
South Carolina	0	0	0	0	1	1
South Dakota	18	3	0	0	0	21
Tennessee	0	0	2	23	4	29
Texas	72	0	0	0	0	72
Utah	0	17	0	0	3	20
Vermont	15	0	0	0	0	15
Virginia	21	0	3	0	0	24
Washington	9	1	0	0	0	10
West Virginia	4	8	8	0	0	20
Wisconsin	13	1	0	0	0	14
Wyoming	0	9	3	0	0	12
	545	235	34	42	30	886

3.3 Area: Table 4 gives the distribution of the Workfile watershed areas by agencies. Most of the area (about 2/3 of the total) is in ARS watersheds, and combined with the Forest Service they make up 87% of the total. Table 5 gives the agency distribution of presently operating watersheds. For these currently active, Table 6 gives a summary comparison to the total US National area and population. As a function of the total US land area (which includes water bodies), experimental watersheds make up about 1/2 of 1%, or one part in 2,000 of the total. On a population basis, there are about 1.4 experimental watersheds per million people, or one per 700,000 people.

Table 4
Distribution of Areas of
Experimental Watersheds

Size Class Boundary (ha)	Agency					TOTAL
	ARS	USFS	USGS	TVA	OTHER	
0.1	4					4
.1	72	3				75
1	199	29		5	2	235
10	110	110	3	14	10	247
100	76	76	13	14	12	185
1000	84	20	2	9	6	121
10000	0	3	16	0	0	19
TOTAL	445	235	34	42	30	886
Min (ha)	0.097	0.518	16.1	1.48	7.77	0.097
Max (ha)	9510	9168	7770	9370	7770	9510

Note: Table entry is number of experimental watersheds

Table 5
Areas of Operating Experimental Watersheds

Agency	#	Area (ha)	Avg (ha)
ARS	91	237431	2609
USFS	127	67759	533
USGS	11	4298	391
TVA	4	37175	9293
OTHER	4	4933	1233
	237	351596	1484

Notes: For all operating ("PR") Watersheds
with area known:

Table 6
US National Experimental Watershed Density

Known area of operating experimental watersheds	351,596	ha
Estimate of US total 1)	478,186	ha
Area of United States	916,556,000	ha
Ratio	0.000522	
Number of known operating experimental watersheds	238	
Estimate of US Total 1)	322	
Population of United States	235,000,000	
Ratio (people/watershed)	729,813	

Notes 1. Based on N = 886 for Workfile, and N = 1200 estimated US total.

3.4 Elevation: Because the elevation data in the Workfile is so fragmentary (605 missing) it is not treated in detail here. This situation resulted in large part from the exclusion from the main ARS document (Burford et al., 1983) of elevation information, and the lack of time and resources to pursue the problem further. Also it is questionable that the elevation data if included, would offer any insights not otherwise gathered. The cover, purpose, and location could serve as fruitful leads to elevations not supplied.

Several extremes are worth mentioning, however. Known high elevation watersheds include the earliest installations: Wagon Wheel Gap (3079-3170 m), Ephriam (3048 m), and four Fraser watersheds (3048-3200 m), reflecting early interest in forest-water yield interactions and high elevation flood sources.

3.5 Chronology and Durations: Analysis of the timing information (i.e., dates of operation) presents some of the more interesting conclusions. The "Dates" Subfile consisted of 783 entries.

First, the development of experimental watersheds in the U.S. shows up clearly, and as a function of contemporary concern and the larger social-political status of the nation. The first experimental watersheds were at Wagon Wheel Gap, Colorado in 1912, followed by the Ephriam Utah experimental watersheds in 1915. These were in response to the then-present forests-and-water controversy which accompanied the turn-of-the-century conservation movement and the establishment of the National Forests. Those were the only experimental watersheds until 1924 when several more were added. There was a dramatic upsurge in the late 1930's in response to the concern for soil conservation and the establishment of the Soil Conservation Service. These watersheds were largely agricultural, although the Forest Service's Coweeta N.C. watersheds were also installed in this era.

The next major influence was World War II, when budget priorities to the war effort resulted in the closure of many of the watersheds established in the 1930's. The decade from the close of World War II to

about 1955 was one of complacency and little change, followed in the late 1950's to the late 60's by a period of water awareness, in which another wave of watersheds were installed. The Vietnam Era and the subsequent period of austerity, up to the present, has seen the decline of the experimental watershed population. This romance is depicted in Figures 2 and 3, which is drawn from the dates subfile (N = 781), and given in Table 7. The high point for experimental watersheds was 1968, when 398 were in operation. These are 228 (from the dates subfile) currently in operation.

To give this information some absolute perspective, accounting must be made for missing data and missing entries. Thus a ratio of 1.42*, reflecting these shortcomings, results in a high of 565 in 1968, and 322 presently operating. These are estimates.

Table 7
Experimental Watershed Census
by Decades

INSTALLED:

Agency	DECADE								TOTAL
	10	20	30	40	50	60	70	80	
ARS	0	7	237	83	59	132	23	0	541
USFS	4	0	31	11	36	63	31	1	177
USGS	0	0	0	0	1	3	0	0	4
TVA	0	0	2	4	4	16	8	6	40
OTHER	0	0	0	1	5	2	10	0	19
TOTAL	4	8	270	99	105	216	72	7	781

TERMINATED

Agency	DECADE								PR	TOTAL
	10	20	30	40	50	60	70	80		
ARS	0	1	11	144	63	77	147	7	91	541
USFS	0	2	0	0	8	13	21	6	127	177
USGS	0	0	0	0	0	0	3	0	1	4
TVA	0	0	0	0	0	5	22	9	4	40
OTHER	0	0	0	0	0	1	14	0	4	19
TOTAL	0	3	1	144	71	96	207	22	227	781

Note: For entries with "start" and "end" date available.
N = 781 or 88% of Workfile

*227 in dates file of 238 presently operating; 1,200 extracted with 886 in workfile. $1.42 = (238 \times 1200) / (227 \times 886)$.

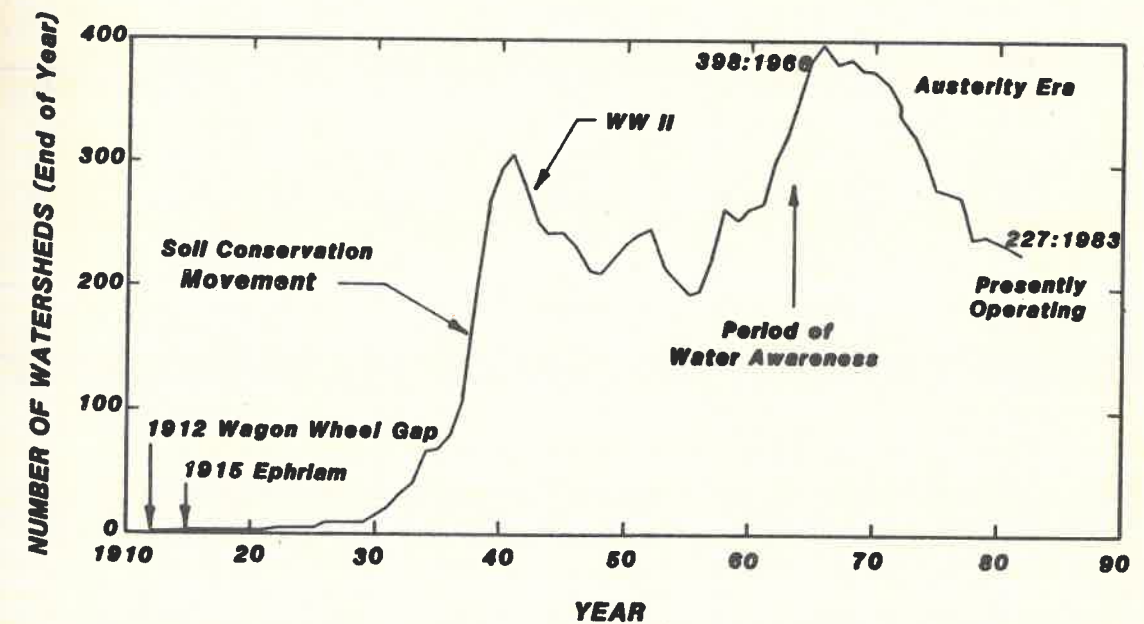
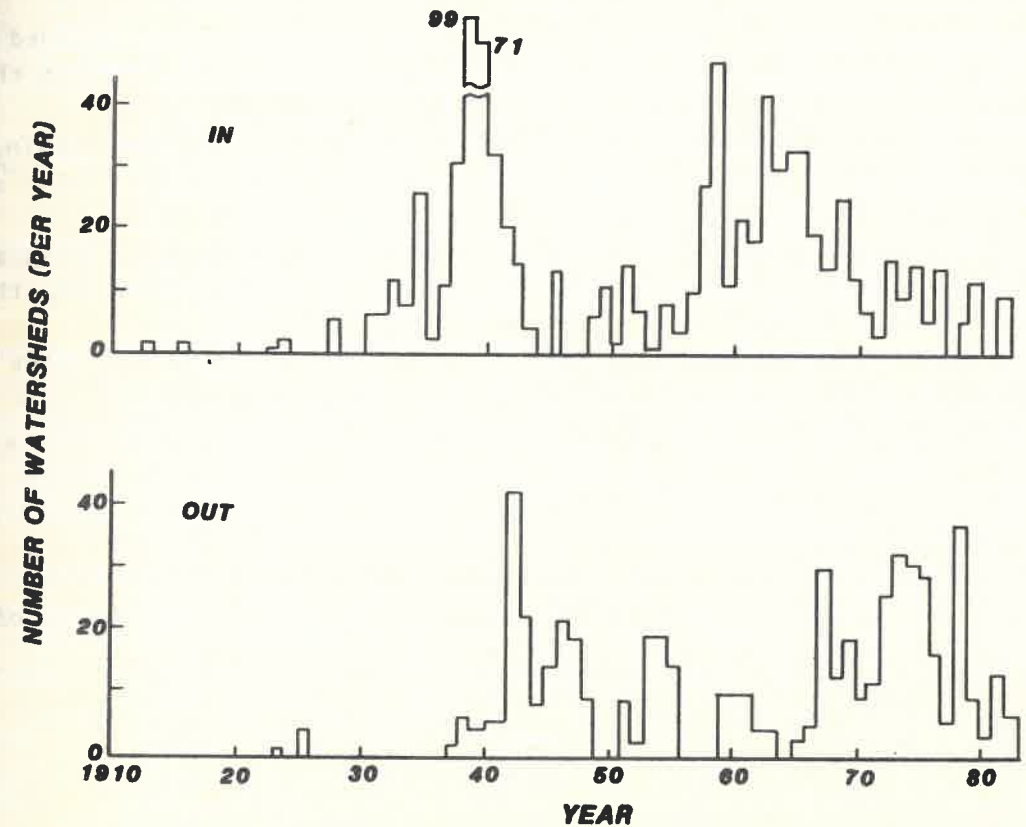


Figure 2 (above) Annual experimental watershed activity, 1912-1982.
Figure 3 (below) Current status of experimental watersheds 1912-1982. For data drawn from Workfile with begin and end dates (the "Dates" file, N = 781).

Second, an estimate can be made of the total experimental watershed information resource. This is shown in Table 8 by agency. By summing the inclusive years of operation (or the area under the plot in Figure 2, 13,740 station-years of experimental watershed operation results. Again, using the ratio of 1.42 to account for data omissions, the round figure of about 20,000 station-years results.

The table also indicates the average watershed duration by agency, and shows the longest durations associated with Forest Service watersheds, the shortest with TVA watersheds.

Third, some watershed installations of long term note and awareness can be tabulated, based on the duration of their operation. These are given in Table 9. The longest running experimental watershed are (were) the Ephriam watersheds A and B on the Wasatch Plateau in central Utah. They are no longer in active operation, though some research has been performed on them recently.

Table 10 shows the chronology of early experimental watersheds up through 1930, which seems to be a distinct beginning of the modern era of experimental watershed popularity.

Table 8

Experimental Watershed Durations

Agency	Duration	Avg	Number	
	Yrs	Yr/WS	in File	PR
ARS	8924	16.5	541	91
USFS	4033	22.8	177	127
USGS	57	14.3	4	1
TVA	471	11.8	40	4
OTHER	255	13.4	19	4
Total	13740	17.6	781	227

Notes: From "Dates" subfile: all entries in Workfile with begin and end dates known. N = 781. A few entries are for intermittently operated watersheds.

3.6 Cover: The exact cover or land type descriptors were left to the judgement of the agency sources supplying data and/or was drawn as possible from the available documents. As previously discussed, it consisted of three -3 column fields, beginning from the most obvious or most fitting characterization of the watershed cover. It is descriptive, rather than ecologically precise. Nonetheless, group searches of the data allowed clustering into broad land types with at least intuitive meaning. As shown in Table 10, these groupings were: forests, rangelands, brush, agriculture, and "others". These categories encompassed every entry for which

Table 9
Long-Duration Experimental Watersheds
(Duration \geq 40 yrs)

Agency	Location	State	Name		Beg	End	Yrs
USFS	Ephriam	UT	Ephriam	A	15	78	64
USFS	Ephriam	UT	Ephriam	B	15	78	64
USFS	Otto	NC	Coweeta	1	34	PR	50
USFS	Otto	NC	Coweeta	2	34	PR	50
USFS	Otto	NC	Coweeta	6	34	PR	50
USFS	Otto	NC	Coweeta	7	34	PR	50
USFS	Otto	NC	Coweeta	8	34	PR	50
USFS	Otto	NC	Coweeta	9	34	PR	50
USFS	Otto	NC	Coweeta	13	36	PR	48
USFS	Otto	NC	Coweeta	14	36	PR	48
USFS	Otto	NC	Coweeta	17	36	PR	48
USFS	Otto	NC	Coweeta	18	36	PR	48
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	102	37	PR	47*
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	196	37	PR	47
ARS	Riesel	TX	Riesel	WI	37	PR	47*
ARS	Riesel	TX	Riesel	Y	37	PR	47*
ARS	Riesel	TX	Riesel	D	37	PR	47*
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	109	38	PR	46
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	131	38	PR	46*
ARS	Riesel	TX	Riesel	S11	38	PR	46*
ARS	Riesel	TX	Riesel	S12	38	PR	46*
ARS	Riesel	TX	Riesel	W10	38	PR	46
ARS	Riesel	TX	Riesel	C	38	PR	46*
ARS	Riesel	TX	Riesel	G	38	PR	46*
ARS	Riesel	TX	Riesel	Y10	38	PR	46*
USFS	Glendora	CA	Bell Cnyn	1	38	PR	46
USFS	Glendora	CA	Bell Cnyn	2	38	PR	46
USFS	Glendora	CA	Bell Cnyn	3	38	PR	46
USFS	Glendora	CA	Bell Cnyn	4	38	PR	46
USFS	Glendora	CA	East Fk		38	PR	46*
USFS	Otto	NC	Coweeta	34	38	PR	46
ARS	Watkinsvil	GA	Watkinsvil	W-1	39	PR	45
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	103	39	PR	45*
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	106	39	PR	45*
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	110	39	PR	45*
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	121	39	PR	45*
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	123	39	PR	45
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	172	39	PR	45*
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	192	39	PR	45*
ARS	Riesel	TX	Riesel	Y-2	39	PR	45
ARS	Riesel	TX	Riesel	Y-6	39	PR	45*
ARS	Riesel	TX	Riesel	Y-7	39	PR	45*

Table 9 (Continued)

Long-Duration Experimental Watersheds
(Duration \geq 40 yrs)

Agency	Location	State	Name		Beg	End	Yrs
ARS	Riesel	TX	Riesel	Y-8	39	PR	45*
ARS	Riesel	TX	Riesel	S-17	39	PR	45*
ARS	Riesel	TX	Riesel	W-6	39	PR	45*
UI	Iowa City	IA	Ralston Cr		24	68	45
USFS	Fraser	CO	Fool Cr		40	PR	44
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	187	41	PR	43*
USFS	Otto	NC	Coweeta	32	41	PR	43
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	104	37	78	42*
AEC	Oak Ridge	TN	Walker		42	PR	42
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	135	38	78	41*
ARS	Coshocton	OH	Coshocton	129	38	78	41*
USFS	Fraser	CO	E St Louis		43	PR	41
USFS	Otto	NC	Coweeta	36	43	PR	41

Notes: * Intermittent operation for the period of record

Table 10

Chronology of Experimental Watersheds Through 1930

AG	Loc	St	Name	Area (ha)	Elev (m)	Dates	Cover	Purpose
USFS	CREEDE	CO	WAG WHL GP A	89.8	3169	12 26	FOR	FOR
USFS	CREEDE	CO	WAG WHL GP B	80.9	3078	12 26	FOR	FOR
USFS	EPHRIAM	UT	EPHRIAM A	4.04	3048	15 78	RGEGRSSRB	REH
USFS	EPHRIAM	UT	EPHRIAM B	4.04	3048	15 78	RGEGRSSRB	REH
ARS	HIGH POINT	NC	HIGH POINT WFD	8539	?	23 53	FORCRPPAS	FORAGR
ARS	IOWA CITY	IA	IOWA CITY	781.	?	24 24	CRPPASFOR	AGR
U 1	IOWA CITY	IA	RALSTON CR	1554	228	24 68	AGRFOR	AGR
ARS	SPUR	TX	SPUR W-1	4.66	?	27 45	AGRCRP	AGRCON
ARS	SPUR	TX	SPUR W-3	4.73	?	27 44	AGRCRP	AGRTERCON
ARS	SPUR	TX	SPUR W-6	2.15	?	27 45	AGRCRP	AGRTER
ARS	SPUR	TX	SPUR W-5	2.35	?	27 45	AGRCRP	AGRTER
ARS	SPUR	TX	SPUR W-2	3.80	?	27 45	AGRCRP	AGR
ARS	GUTHRIE	OK	GUTHRIE W-3	1.26	?	30 51	CRPCNVGRS	GEN
USFS	OGDEN	UT	DAVIS CO	9168	2081	30	PR GRSSRBFOR	REH
ARS	SPUR	TX	SPUR W12	3.40	?	30 45	AGRCRP	AGRCON
ARS	SPUR	TX	SPUR W15	3.43	?	30 45	AGRCRP	AGRCON
ARS	SPUR	TX	SPUR W14	3.45	?	30 45	AGRCRP	AGR
ARS	SPUR	TX	SPUR W11	3.52	?	30 45	AGRCRP	AGR

cover information was supplied. Because each entry could have as many as three (3) cover descriptors, some watersheds were counted in more than one of the broad cover groupings. Thus, the rows in Table 10 do not sum to agency totals.

Some notable observations emerge from the clustering in Table 10.

First, "range" lands seem to predominate experimental watersheds with 396 entries. This may be a reflection of the dominance of western and semi-arid locations in the Workfile, or 2) the inclusion of MDW (meadow) and PAS (pasture) in the range category. Some might argue that meadows and pastures are more closely allied with agriculture. "Forests" are also a frequent (386) cover descriptor, with over half of these (203) associated with Forest Service watersheds. "Agriculture" cover ranks third (315), and these are almost all associated with ARS watersheds. This ranking seems inconsistent with the role and importance of agriculture in the US economy.

Though the profiles of the agencies and culture protrude through the data, interest-cover overlaps are obvious. The ARS cover includes 90 forested (at least partially) watersheds, and 342 "range" watersheds. As previously discussed this latter observation may be an artifact of the inclusion of meadow and pasture in the range category. Though Forest Service activities cover a great deal of range management, there is a district predominance of forest cover in their experimental watersheds. Range watershed hydrology research seems to be centered in the ARS.

Table 11

Experimental Watershed Cover

AGENCY	Forests	Range	Brush	Agric	Others	?
ARS	90	342	0	287	0	43
USFS	203	43	21	3	0	0
USGS	24	2	2	17	2	2
TVA	25	1	0	15	10	0
OTHER	26	9	0	5	1	0
TOTAL	386	397	23	315	13	45

Notes: "Forests" = FOR, HDW, PIN, OAK, HIC, FIR, CON "Range" = RGE, GRS, SRB, MDW, PAS, TAI, BAR "Brush" = BSH, CHP, JUN "Agric" = AGR, CRP, FAL, ORC "Other" = MIN, URB

Data from full Workfile

3.7 Purpose: The "purpose" of the experimental watershed was also left to the source agency or drawn from the descriptive documents. Sometimes this was clear-cut, but often the information was vague or not supplied. The purpose was intended to be on land management or land

condition terms: e.g., forestry to mean that the experimental watershed was established to research the impact of forest management on some aspect of hydrology. Thus, the hydrologic aims were not targeted, as these were outputs of the experiment, not inputs. However, experimental watersheds also include those established for general scientific study of processes or details in the hydrologic cycle, or for "control" to be used for correlation with nearby treatment watersheds.

The clusters were then centered around land uses: forest management, range management, agriculture, and "others". There is also a category for "general" and/or control. This clustering by agencies is given in Table 11.

As with the cover results, some impressions arise easily. Again the ARS predominates in both range and agricultural situations, paralleling the cover statistics; and the Forest Service dominates forest management. Again, however, the coverage is not exclusive: the ARS has made an apparent district effort in forest management, and the Forest Service even has one (1) experimental watershed in which the impact of agriculture is the study purpose!

The "others" purpose category includes mining, urbanization, weather modification, sludge disposal (one entry) and rehabilitation. It is here that the three less represented agency groupings (USGS, TVA, and OTHER) show dominance, reflecting their more closely focused missions and the ability of more local entities (universities for example) to pursue special problems.

Table 12

Experimental Watershed Purpose

AGENCY	Forest Mgt	Range Mgt	Agric	Others	Genl & Control	?
ARS	30	164	257	6	34	68
USFS	148	17	1	21	53	0
USGS	0	7	5	20	0	2
TVA	11	0	0	14	16	1
OTHER	14	2	5	17	2	0
TOTALS	203	190	268	68	105	71

Notes: Forest Mgt = FOR Range Mgt = RGE, GRZ Agriculture = AGR, CON, TER, FUR, DOR Others = MIN, URB, WMD, SLG, REH Gen/Control = GEN, CTR, RES

Data from full Workfile

4. CONCLUDING REMARKS

4.1 Conclusions: A series of highlights stand out from this study:

1. Of the many experimental watersheds installed since 1912, only a minor fraction remain, i.e., about 27%.
2. The data characterizes the roles of the institutionalized research agencies, though some surprises do emerge.
3. The experimental watershed population rises and falls in response to society's economic health and perceived needs. This is a natural manifestation of their role as a source of hydrologic information for decision making and policy formation.
4. There is a considerable stock of land-sensitive hydrologic data from experimental watersheds already in existence, (about 20,000 station-years), though it may not meet modern needs.
5. Experimental watersheds occupy a very small portion of the land area, about 1/20 of 1%, and are rare in terms of population density.

4.2 Continuation: Contributors with additions to the data file, corrections, clarifications, etc. are urged to submit them to the author for inclusion. The file will be updated periodically, and will be available to interested parties.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

Much data advice help was obtained from Mr. J. B. Burford, USDA, ARS, Beltsville, Maryland; Mr. John Corliss, USDA, Forest Service, Washington D.C.; Mr. Wilford Thomas, U.S.D.I., Geological Survey, Washington, D.C., and Mr. Roger P. Betson, Tennessee Valley Authority, Knoxville, Tennessee. Assistance in computer programming was given by Mr. Kim A. Marshall of Utah State University. Data assembly and input was by several graduate students: Dan J. Kotansky, Micheline A. Devaurs, Michael Kress, and J. Rockford Cogar. The conscientious attention to typing detail by Ms. Lana Barr and Ms. Connie Woodhead is appreciated.

This effort was supported in part by the Utah Agricultural Experiment Station. This is Utah AES Journal No. 2907.

6. REFERENCES

- American Geophysical Union. Section on Hydrology. Inventory of Representative and Experimental Watershed Studies Conducted in the United States. Prepared under the auspices of the Section on Hydrology, American Geophysical Union, for the Committee on Status and Needs of the Section on Hydrology, AGU, and Symposium on Representative and Experimental Watersheds. Sponsored by International Association of Scientific Hydrology and UNESCO, September 28-October 5, 1965, Budapest, Hungary. Washington, D.C., AGU, 1965. 153pp.
- Betson, Roger. 1983. Personal Communication. Tennessee Valley Authority, Knoxville, Tennessee.
- Burford, James B. 1971. Hydrologic data for experimental agricultural watersheds in the United States, 1964. U.S. Department of Agriculture Miscellaneous Publication No. 1194, 460 pp.
- Burford, James B. 1972. Hydrologic data for experimental agricultural watersheds in the United States, 1965. U.S. Department of Agriculture Miscellaneous Publication No. 1216, 568 pp.
- Burford, James B. 1972. Hydrologic data for experimental agricultural watersheds in the United States, 1966. U.S. Department of Agriculture Miscellaneous Publication No. 1226, 399 pp.
- Burford, James B., and John M. Clark. 1973. Hydrologic data for experimental agricultural watersheds in the United States, 1967. U.S. Department of Agriculture Miscellaneous Publication No. 1262, 634 pp.
- Burford, James B., Jane L. Thurman, and Ralph T. Roberts. 1982. Hydrologic data for experimental agricultural watersheds in the United States, 1973. U.S. Department of Agriculture Miscellaneous Publication No. 1420, 404 pp.
- Burford, James B., Jane L. Thurman, and Ralph T. Roberts. March, 1983. Retrieval Procedures for Hydrologic Data from ARS Experimental Watersheds in the United States (RE-PHLEX). U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Agricultural Reviews and Manuals Arm-NE-9. 114 pp.
- Corliss, John F. 1983. Personal Communication. Principal Soil Scientist, Forest Environment Research, Washington, D.C.
- Hawkins, Richard H. 1961. A study to predict storm runoff from storm characteristics and antecedent basin conditions. M.S. Thesis, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. March, 1961. 76 pp.
- Hawkins, Richard H. 1976. Runoff curve numbers for Northern Arizona watersheds. Contact No. 171-4-75, Project Report, Utah State University, Watershed Science Unit, Logan, Utah. 59 pp.
- Hobbs, Harold W. 1963. Hydrologic data for experimental agricultural watersheds in the United States, 1956-1959. U.S. Department of Agriculture Miscellaneous Publication No. 945, Section 5.6-1 to 67.2-4.
- Hobbs, Harold W. 1968. Hydrologic data for experimental agricultural watersheds in the United States, 1962. U.S. Department of Agriculture Miscellaneous Publication No. 1070, 447 pp.
- McGurk, Bruce J. 1983. Personal Communication Hydrologist, USDA, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California.
- Molnau, Myron. 1983. Personal Communication. Professor and State Climatologist, Department of Agricultural Engineering, University of Idaho, Moscow, Idaho.
- National Research Council. 1969. Representative and experimental research basins in the United States, 1967-1974. National Research Council, U.S. National Committee for the International Hydrological Decade, Work Group on Representative and Experimental Basins. 267 pp.
- Pankey, Jan M., and Norbert V. DeByle. Unpublished. Streamflow summaries from twelve tributaries of Farmington Creek, Davis County Experimental Watersheds, Northern Utah. 157 pp.
- U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. 1983. Inventory--ARS active experimental watersheds as of January 1, 1983. 9 pp.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1977. Non-Point Water Quality Modeling in Wildland Management: A State-of-the-Art Assessment (Volume II-Appendixes). EPA-600/3-77-078. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development. 568 pp.
- Van Haveren, B. V. 1981. Wagon Wheel Gap watershed experiment revisited. Proc. of the Western Snow Conference, 1981. pp. 131-138.

7. DATA APPENDIX

The following pages contain a printout of the Workfile, arranged alphabetically by states, and alphabetically within states.

The column headings are:

1. Agency, with the following abbreviations
 ARS: Agricultural Research Science and/or predecessor agency
 USFS: U.S. Forest Service
 USGS: U.S. Geological Survey
 TVA: Tennessee Valley Authority
 A number of other identifying abbreviation are used as obvious.
2. Location: Closest identifiable geographic community
3. State--Using U.S. Post Office state abbreviations
4. Name of Watershed. The primary watershed name. Ex: Beaver Creek
5. Name--secondary. Usually a fork, branch, tributary, or subwatershed number. Ex: 16.
6. Area in hectares
7. Elevation in meters. The mean was intended.
8. Beginning date. Year watershed operation began.
9. Ending date. Year measurements ceased. "PR" means presently operating (10-83)
- 10-12. Cover descriptors. Three 3-column fields. See attached listing.
- 13-15. Purpose descriptors. Three 3-column fields. See attached listing.
16. Special notes. "I" indicates intermittent operation.

Cover Descriptors

AGR--agriculture
 BAR--bare
 CON--conifer
 CNV--conversion
 CRP--crops (row crops)
 DST--desert
 FAL--fallow
 FIR--fir
 FOR--forest or woods
 GRS--grass
 HDW--hardwood
 HIC--hickory
 JUN--juniper
 MDW--meadow
 MIN--mines
 MXD--mixed
 NTV--native
 OAK--oak
 ORC--orchards
 PAS--pasture
 PIN--pine
 RGE--range
 SGE--sage
 SRB--shrub

Purpose Descriptors

AGR--Agriculture
 CON--contours
 CTR--control
 CNV--conversion
 FOR--Forestry
 FUR--furrows
 GWA--groundwater
 GEN--general
 GRZ--grazing
 IRR--irrigation
 MIN--mining
 RES--research
 REH--rehabilitation
 RGE--range
 SLG--sludge
 TER--terraces
 URB--urban

TAI--taiga
 URB--urban

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-12	13-15
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	J	146	1505	58	PR	FORJUN	GEN
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	9	453	2103	58	76	FORPIN	GEN
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	14	545	2090	59	81	FORPIN	GEN
USFS	FLAGSTAFF	AZ	HEBER	3	23.4	?	72	?	FORPIN	FOR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	17	121	2078	63	PR	FORPIN	FOR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	16	101	2136	63	81	FORPIN	FOR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	HEBER	4	25.9	?	72	?	FORPIN	FOR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	7	823	2011	58	73	FORPIN	GEN
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	2	50.9	1548	58	PR	FORJUN	CTR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	RATTLEBURN	2	7.68	?	72	?	FORPIN	FOR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	5	26.7	1908	58	73	FORPIN	CTR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	20	6620	1944	62	PR	FORPIN	CTR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	8	729	2103	58	PR	FORPIN	GEN
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	13	368	2057	59	PR	FORPIN	GEN
USFS	FLAGSTAFF	AZ	RATTLEBURN	3	18.2	?	72	?	FORPIN	CTR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	RATTLEBURN	1	5.26	?	72	?	FORPIN	FOR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	10	231	1987	58	81	FORPIN	GEN
USFS	FLAGSTAFF	AZ	HEBER	1	7.68	?	72	?	FORPIN	FOR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	18	98.3	2020	63	PR	FORPIN	CTR
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	12	184	2069	59	81	FORPIN	GEN
USFS	FLAGSTAFF	AZ	BEAVER CR	19	4893	1973	62	PR	FORPIN	GEN
ARS	SAFFORD	AZ	SAFFORD	WIV	309	?	39	69	RGEARSRB	RGE
ARS	SAFFORD	AZ	SAFFORD	W-1	210	?	39	69	RGEARSRB	RGE
ARS	SAFFORD	AZ	SAFFORD	W-V	292	?	39	69	RGEARSRB	RGE
ARS	SAFFORD	AZ	SAFFORD	WIL	276	?	39	69	RGEARSRB	RGE
USFS	TEMPE	AZ	WILLOW CR	EFK	199	?	58	?	FORCON	FOR
USFS	TEMPE	AZ	WHITESPAR	A	121	1920	58	?	CHP	REH
USFS	TEMPE	AZ	THREE BAR	B	28.3	1310	56	?	CHP	RGE
USFS	TEMPE	AZ	MINGUS	F	25.9	1965	58	?	CHP	RGE
USFS	TEMPE	AZ	THOMAS CR	SFK	243	?	60	?	FORXDCON	GEN
USFS	TEMPE	AZ	THREE BAR	C	38.8	1310	56	?	CHP	RGE
USFS	TEMPE	AZ	THOMAS CR	NFK	178	?	60	?	FORMXDCON	GEN
USFS	TEMPE	AZ	CASTLE CR	EFK	470	?	56	?	FORPIN	FOR
USFS	TEMPE	AZ	7 SPRINGS	WFK	194	?	63	?	GRS	RGE
USFS	TEMPE	AZ	THREE BAR	D	33.5	1310	56	?	CHP	RGE
USFS	TEMPE	AZ	CASTLE CR	WFK	364	?	56	?	FORPIN	FOR
USFS	TEMPE	AZ	MINGUS	A	38.8	1965	58	?	CHP	REH
USFS	TEMPE	AZ	MINGUS	C	18.1	1965	58	?	CHP	REH
USFS	TEMPE	AZ	WHITESPAR	B	98.3	1920	58	?	CHP	FOR
USFS	TEMPE	AZ	WILLOW CR	WFK	117	?	58	?	FORCON	FOR
USFS	TEMPE	AZ	THREE BAR	B	18.2	1310	56	?	CHP	RGE
USFS	TEMPE	AZ	7 SPRINGS	EFK	302	?	63	?	GRS	RGE
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	11	823	?	63	74	DSTGRSRRB	GEN
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	112	1.86	?	62	PR	RUEPAS	RGE
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	W-5	2229	?	54	73	DSTREGRS	GEN
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	9	1351	?	66	74	RUEPAS	RGE
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	9	2359	?	68	74	RUEPAS	RGE
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	W-3	898	?	54	74	DSTGRSRRB	GEN
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	102	1.57	?	63	PR	RUEPAS	RGE
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	W-1	1493	?	54	74	DSTGRSRRB	GEN
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	10	1663	?	68	74	RUEPAS	RGE
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	101	1.13	?	62	PR	RUEPAS	RGE
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	104	4.45	?	63	PR	RUEPAS	RGE
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	103	3.35	?	63	PR	DSTGRSRRB	GEN
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	106	.687	?	65	PR	RUEPAS	RGE
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	8	1549	?	63	74	DSTGRSRRB	GEN
ARS	TOMBSTONE	AZ	WALNUT GL	W-6	9510	?	62	74	RUEPAS	RGE

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-12	13-15		
USGS	MACK	CO	BADERWASH	1-A	1813	1524	54	PK	DSTSRB	AGR		
USGS	HACK	CO	BADERWASH	1-A	1813	1524	54	PK	DSTSRB	AGR		
USFS	WOODLAND	PK	CO	MISSOURI	G	NFK	607.	2606	51	59	HDXRSPFOR	FORGRZ
USFS	WOODLAND	PK	CO	MISSOURI	G	SFK	485.	2606	51	59	HDXRSPFOR	FORGRZ
USFS	WOODLAND	PK	CO	MISSOURI	G	SFK	1861	2606	39	59	FORCONHDM	FORGRZ
ARS	VERO BEACH	FL	VERO BEACH	M-3	4947	7	55	PR	AGRFORRGE	AGR		
ARS	VERO BEACH	FL	VERO BEACH	M-5	9168	7	64	PR	PASGR	AGR		
ARS	VERO BEACH	FL	VERO BEACH	M-2	2553	7	55	PR	PASFORRGE	GRZ		
ARS	AMERICUS	GA	AMERICUS	W11	17.3	7	38	42	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	AMERICUS	GA	AMERICUS	W1V	23.9	7	38	43	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	AMERICUS	GA	AMERICUS	W11	12.9	7	38	42	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	AMERICUS	GA	AMERICUS	W-1	7.24	7	38	43	AGRCRPPIN	AGR		
U	GA	ATHENS	GA	WHITEHALL	24.1	7	66	74	FORPINHDM	FOR		
U	GA	ATHENS	GA	BE GRANT H 14	31.1	7	73	7	FORPINHDM	FOR		
U	GA	ATHENS	GA	BE GRANT H 15	42.4	7	73	7	FORPINHDM	FOR		
ARS	BASIN	W-1	GA	BASIN W-1	7.77	225	7	7	HDXRGRFOR	AGR		
ARS	TIFTON	GA	TIFTON	WTF	1149	7	68	PR	HDX	7		
ARS	TIFTON	GA	TIFTON	WTO	1593	7	68	PR	HDX	7		
ARS	TIFTON	GA	TIFTON	WTF	271.7	7	68	PR	HDX	7		
ARS	TIFTON	GA	TIFTON	WTF	2212	7	70	PR	HDX	7		
ARS	TIFTON	GA	TIFTON	WTF	5001	7	68	PR	HDX	7		
ARS	TIFTON	GA	TIFTON	WTK	1675	7	68	PR	HDX	7		
ARS	TIFTON	GA	TIFTON	WTK	3343	7	69	PR	HDX	7		
ARS	TIFTON	GA	TIFTON	WTF	1566	7	68	PR	HDX	7		
ARS	WATKINSVILLE	GA	WATKINSVILLE	P-1	2.69	7	72	75	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	WATKINSVILLE	GA	WATKINSVILLE	W-1	7.77	7	39	PR	GRSPAS	AGR		
ARS	WATKINSVILLE	GA	WATKINSVILLE	P-3	1.25	7	72	75	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	WATKINSVILLE	GA	WATKINSVILLE	P-4	1.38	7	73	75	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	WATKINSVILLE	GA	WATKINSVILLE	P-2	1.29	7	73	75	RGEPAS	RGE		
ARS	KUNIA	HI	KUNIA	W-6	2.86	7	75	77	7	7		
ARS	LAUPAHOEHO	HI	LAUPAHOEHO	W-1	829	7	72	78	7	7		
ARS	WAIALUA	HI	WAIALUA	W-1	2.84	7	72	78	7	7		
ARS	AMES	IA	FOURNI C	5	5.92	7	76	78	7	7		
ARS	AMES	IA	FOURNI C	7	149	7	76	78	7	7		
ARS	AMES	IA	FOURNI C	3	5.05	7	76	78	7	7		
ARS	AMES	IA	FOURNI C	6	284	7	76	78	7	7		
ARS	AMES	IA	FOURNI C	4	6.36	7	76	78	7	7		
ARS	CLARINDA	IA	CLARINDA	W-2	1.26	7	32	42	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	CLARINDA	IA	CLARINDA	W-4	7.97	7	34	42	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	CLARINDA	IA	CLARINDA	W-X	7.97	7	34	42	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	CLARINDA	IA	CLARINDA	W-Y	1.31	7	32	42	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	CLARINDA	IA	CLARINDA	W-V	1.31	7	32	42	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	IOWA CITY	IA	IOWA CITY	781	7	24	24	CRPPASFOR	AGR			
U	IOWA CITY	IA	RALSTON CR	1554	228	24	68	AGRFOR	AGR			
ARS	SHEWANDOAH	IA	SHEWANDOAH	2	2719	7	34	40	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	TREYNOR	IA	TREYNOR	W-5	157	7	63	73	AGRCRPPIN	AGRTER		
ARS	TREYNOR	IA	TREYNOR	W-2	33.5	7	64	PR	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	TREYNOR	IA	TREYNOR	W-4	60.7	7	64	PR	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	TREYNOR	IA	TREYNOR	W-3	43.3	7	64	PR	AGRCRPPIN	AGR		
ARS	TREYNOR	IA	TREYNOR	W-1	30.1	7	64	PR	AGRCRPPIN	AGR		
USFS	BENTON	IA	BENTON CR	383	1188	65	7	FORCON	FOR			
USFS	BOISE	ID	EGERS CR	128	1706	62	PR	FORCONHDM	FOR			
USFS	BOISE	ID	SILVER CR	5	103	1533	65	PR	FOR			
USFS	BOISE	ID	ZENA CR	836	7	59	7	FOR	FOR			
USFS	BOISE	ID	DITCH CR	101	1645	62	PR	FORCONHDM	FOR			
USFS	BOISE	ID	SILVER CR	8	111	1607	79	PR	FOR			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-12	13-15
USFS	BOISE	ID	CABIN CR	109	1584	62	PK	FORCONHDM	FOR	
USFS	BOISE	ID	CANTROL	162	1584	62	PK	FORCONHDM	FOR	
USFS	BOISE	ID	CREEK	186	1773	62	PK	FORCONHDM	FOR	
USFS	BOISE	ID	SILVER CR	4	106	1630	66	PR	FOR	
USFS	BOISE	ID	SILVER CR	1	194	1780	66	PR	FOR	
USFS	BOISE	ID	SILVER CR	7	721	7	64	PR	FOR	
USFS	BOISE	ID	SILVER CR	2	25.9	1623	62	PR	FOR	
USFS	BOISE	ID	SILVER CR	2	118	1728	62	PR	FORCONHDM	
USFS	BOISE	ID	SILVER CR	6	201	1597	61	PR	FOR	
USFS	BOISE	ID	SILVER CR	3	129	1732	66	PR	FOR	
ARS	EMMETT	MT	EMMETT	W-2	28.0	7	38	41	RGEPASCRP	GRZ
U	I	GENESE	ID	LITTLE POT	88.7	7	38	41	RGESE	RGE
U	I	GENESE	ID	COW CREEK	595	990	76	79	AGRCRPPIN	AGR
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	18	84.5	1662	74	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	25	31.9	1599	78	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	14	63.5	1595	74	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	16	28.7	1656	74	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	4	144	1508	74	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	3525	7	65	PR	FOR		
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	26	38.4	1596	78	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	2	57.4	1505	74	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	10	65.1	1515	74	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	MPK	1699	1534	65	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	EPK	1441	1537	65	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	27	67.9	1576	78	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	30	36.8	1526	78	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	6	104	1508	74	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	8	145	1517	74	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	9	23.4	1483	74	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	33	33.1	1492	78	PR	FOR	
USFS	GRANGEVILL	ID	HORSE CR	12	87.0	1569	74	PR	FOR	
USFS	MCCALL	ID	WBR WEISER	1031	7	59	7	FORPINFIR	FOR	
ARS	MOSCOW	ID	ROCKHAIN	21.4	7	76	79	7	7	
ARS	MOSCOW	ID	ROCKCHCK	71.9	7	37	44	AGRCRPPIN	AGR	
ARS	MOSCOW	ID	MURPHY CR	898	7	76	79	7	7	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	59.4	7	37	42	AGRCRPPIN	AGR	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	123	1615	62	75	SRB	RGE	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	5444	7	66	PR	RGESEFOR	GRZ	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	1409	7	73	PR	7	7	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	25.6	7	70	76	7	7	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	3638	7	64	PR	RGESE	RGE	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	40.4	2072	62	PR	RGESE	RGE	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	13.3	7	67	PR	RGESE	GRZ	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	3175	7	65	PR	RGESE	RGE	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	955	7	68	74	7	7	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	2335	7	63	PR	RGESE	RGE	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	6.35	7	70	75	7	7	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	14.1	7	68	74	7	7	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	82.9	7	67	77	RGESE	GRZ	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	40.4	7	63	PR	RGESE	GRZ	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	50.9	7	65	PR	RGEPAS	RGE	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	123	7	67	78	RGESE	GRZ	
ARS	REYNOLDS	ID	REYNOLDS	50.9	2072	68	75	HDXRSPFOR	FOR	
USFS	SF	SALMON	ID	TAILHOLT	657	1524	59	7	FORPINFIR	FOR
USFS	SF	SALMON	ID	CIRCLE END	376	1524	62	7	FORPINFIR	FOR

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-12	13-15
ARS	COLLEGE PK MD COLLEGE PK W-2	3.01	7							
ARS	COLLEGE PK MD COLLEGE PK W-3	2.03	7							
ARS	COLLEGE PK MD COLLEGE PK W-4	1.23	7							
ARS	COLLEGE PK MD COLLEGE PK W-5	4.87	7							
ARS	COLLEGE PK MD COLLEGE PK W-6	3.32	7							
ARS	COLLEGE PK MD COLLEGE PK W-7	1.64	7							
ARS	COLLEGE PK MD COLLEGE PK W-8	9.83	7							
ARS	COLLEGE PK MD COLLEGE PK W-9	1.42	7							
ARS	COLLEGE PK MD COLLEGE PK W-10	2.03	7							
ARS	COLLEGE PK MD COLLEGE PK W-11	1.42	7							
USGS	GEORGES CR HD TROTTERS	32.6	7							
ARS	HAGENSTOWN HD HAGERSTOWN W-1	18.7	7							
ARS	E LANSING MI E LANSING W	.667	7							
ARS	E LANSING MI E LANSING A	.801	7							
ARS	E LANSING MI E LANSING B	.546	7							
USFS	GRAND RAPI MN WTRSHD #2	9.71	7							
USFS	MARCELL MN MARCELL 6	8.90	423							
USFS	MARCELL MN MARCELL 2	9.71	573							
USFS	MARCELL MN MARCELL 5	52.6	423							
USFS	MARCELL MN MARCELL 1	34.8	411							
USFS	MARCELL MN MARCELL 7	8.09	414							
USFS	MARCELL MN MARCELL 3	53.0	414							
USFS	MARCELL MN MARCELL 4	34.8	429							
ARS	BETHANY MO BETHANY LJI	.862	7							
ARS	BETHANY MO BETHANY PAA	.821	7							
ARS	BETHANY MO BETHANY U-2	3.24	7							
ARS	BETHANY MO BETHANY PAC	.797	7							
ARS	BETHANY MO BETHANY PAB	2.25	7							
ARS	BETHANY MO BETHANY U-1	3.03	7							
ARS	BETHANY MO BETHANY U-8	.857	7							
ARS	BETHANY MO BETHANY U-3	1.81	7							
ARS	MCKREDIE MO MCKREDIE W-1	62.3	252							
ARS	MCKREDIE MO MCKREDIE 2	17.9	7							
ARS	OXFORD MS OXFORD 17A	1295	7							
ARS	OXFORD MS OXFORD WJ2	8093	7							
ARS	OXFORD MS OXFORD WC2	.586	7							
USFS	OXFORD MS COFFEYVILLE									
ARS	OXFORD MS OXFORD W-4	639.	7							
ARS	OXFORD MS OXFORD W10	2237	7							
ARS	OXFORD MS OXFORD W35	3055	7							
ARS	OXFORD MS OXFORD W-5	404.	7							
ARS	OXFORD MS OXFORD W12	9227	7							
ARS	OXFORD MS OXFORD W28	437.	7							
ARS	OXFORD MS OXFORD W17	1299	7							
ARS	OXFORD MS OXFORD W34	3035	7							
ARS	OXFORD MS OXFORD W24	206.	7							
USFS	OXFORD MS OXFORD 14.5	7								
ARS	OXFORD MS OXFORD 35A	441.	7							
ARS	AHOSKIE NC AHOSKIE WAI	1476	7							
ARS	AHOSKIE NC AHOSKIE WA3	958.	7							
ARS	AHOSKIE NC AHOSKIE WA2	6216	7							
ARS	AHOSKIE NC AHOSKIE WA4	673.	7							
ARS	HIGH POINT NC HIGH POINT UR	2925	7							
ARS	HIGH POINT NC HIGH POINT WED	8539	7							
ARS	HIGH POINT NC HIGH POINT HC	4168	7							

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-12	13-15
USFS	DURHAM NH HUBBARD BR 7	3108	518	7						
USFS	W.THORNTON NH HUBBARD BR 7	76.4	612	7						
USFS	W.THORNTON NH HUBBARD BR 4	36.0	441	61						
USFS	W.THORNTON NH HUBBARD BR 3	42.4	496	58						
USFS	W.THORNTON NH HUBBARD BR 8	59.0	594	69						
USFS	W.THORNTON NH HUBBARD BR 5	21.8	490	63						
USFS	W.THORNTON NH HUBBARD BR 6	13.3	548	62						
USFS	W.THORNTON NH HUBBARD BR 1	11.7	487	56						
USFS	W.THORNTON NH HUBBARD BR 2	15.7	496	57						
ARS	FREEHOLD NJ FREEHOLD W-1	7.08	7							
ARS	FREEHOLD NJ FREEHOLD LII	20.9	7							
ARS	FREEHOLD NJ FREEHOLD WII	13.3	7							
ARS	ALBUQUERQU NM ALBUQUERQU WII	16.2	7							
ARS	ALBUQUERQU NM ALBUQUERQU LII	62.7	7							
USFS	ALBUQUERQU NM SAN LUIS B	777.	1889							
ARS	ALBUQUERQU NM ALBUQUERQU W-1	39.3	7							
ARS	FTSTAUNTON NM FTSTAUNTON 2	13.0	7							
ARS	FTSTAUNTON NM FTSTAUNTON 1	9.87	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W-6	2246	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W10	6968	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W15	1918	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W13	1359	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W14	1440	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W-1	75.6	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W-8	8462	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W-3	536.	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W12	1031	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W-2	246.	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W-7	3437	7							
ARS	MEXICAN SP NM MEXICAN SP W11	1864	7							
ARS	SANTA FE NM SANTA FE LII	20.8	7							
ARS	SANTA FE NM SANTA FE WII	319.	7							
ARS	SANTA FE NM SANTA FE W-1	57.0	7							
ARS	SANTA ROSA NM SANTA ROSA W-1	1735	7							
U NV	RENO NV TRUCKEE R	7770	7							
ARS	ARNOT FOR NY ARNOT FOR W-4	7.24	7							
ARS	ARNOT FOR NY ARNOT FOR W-1	7.24	7							
ARS	COHOCTON NY COHOCTON III	9.79	7							
ARS	COHOCTON NY COHOCTON WII	5.58	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 183	30.0	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 107	1.04	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 111	.477	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 132	.238	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 11	118.	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 109	.683	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 182	28.1	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 169	11.7	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 191	.485	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 10	49.3	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 97	1853	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 174	21.3	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 5	141.	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 102	.509	7							
ARS	COSHOCCTON OH COSHOCTON 135	1.08	7							

Table with columns 1-15. Rows include locations like CHICKASHA, OK GARLAND, TX GARLAND, etc., with associated codes and numbers.

Table with columns 1-15. Rows include locations like KNOXVILLE, TN WHITE HOLE, TX GARLAND, etc., with associated codes and numbers.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-12	13-15
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	CR	818.7	?	59 69	FORPAS	?	AGR
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	TC	1235.7	?	57 69	PASCORP	?	AGR
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	FC	157.7	?	60 69	FORPASHUW	?	FOR
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	PHB	77.7	?	58 69	FORPAS	?	AGR
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	LII	7.81	?	39 67	AGRCRP	?	AGR
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	WIV	1.41	?	51 67	AGRCRP	?	AGR
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	CC	318.7	?	57 PR	PASCORP	?	AGR
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	LWC	595.7	?	58 74	FORCCKP	?	?
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	LHC	73.6	?	58 69	PASFORCPR	?	AGR
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	WVI	3.11	?	51 67	AGRCRP	?	AGR
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	W-V	2.46	?	52 67	AGRCRPHDW	?	AGR
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	BC	361.7	?	57 PR	PASFORCPR	?	?
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	RRB	224.7	?	58 PR	FORPAS	?	?
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	CB	428.7	?	60 PR	FORPASHDW	?	FOR
ARS	BLACKSBURG	VA	BLACKSBURG	WII	2.20	?	39 51	AGRCRP	?	AGRCUN
ARS	CHATHAM	VA	CHATHAM	WII	6.51	?	38 48	AGRCRPSRB	?	AGR
ARS	CHATHAM	VA	CHATHAM	LII	6.92	?	38 48	AGRCRP	?	AGR
ARS	CHATHAM	VA	CHATHAM	W-I	5.38	?	38 48	AGRCRP	?	AGR
USGS	COUNCIL	VA	GRISSON	CR	?	?	?	?	?	AGR
USGS	HURLEY	VA	BARTON	FR	?	?	?	?	?	MIN
USGS	HURLEY	VA	PUMPKIN	BR	155.7	?	?	?	?	MIN
ARS	STAUNTON	VA	STAUNTON	LII	2486.7	?	48 55	PASCORP	?	GRZ
ARS	STAUNTON	VA	STAUNTON	W-I	981.7	?	48 55	PASCORP	?	GRZ
ARS	STAUNTON	VA	STAUNTON	W-I	157.7	?	48 55	PASCORP	?	GRZ
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-9	46.9	?	61 78	?	?	?
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-7	2180.7	?	61 76	?	?	?
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-3	836.7	?	60 PR	FORHDPAS	?	FOR
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-1	227.7	?	64 75	?	?	?
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-10	1631.7	?	63 75	?	?	?
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-5	1111.7	?	60 79	FORHDPAS	?	FOR
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-4	4251.7	?	60 74	FORCPRPAS	?	AGR
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-1	4294.7	?	58 76	FORHDPAS	?	FOR
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-2	203.7	?	64 75	?	?	?
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-6	297.7	?	65 75	?	?	?
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-13	102.7	?	65 75	?	?	?
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-8	1564.7	?	61 79	?	?	?
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-14	370.7	?	65 75	?	?	?
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-6	67.9	?	68 75	?	?	?
ARS	DANVILLE	VT	N DANVILLE	W-2	59.0	?	58 78	PASHDPHW	?	?
ARS	DAYTON	WA	DAYTON	W-1	7.77	?	39 42	AGRCRP	?	AGRCUN
USFS	ENTLAI	BAS	WA	ENTLAI	BAS	1942	1219	61 PR	FOR	FOR
ARS	PULLMAN	WA	PULLMAN	GS6	6.15	?	32 46	AGRCRP	?	AGR
ARS	PULLMAN	WA	PULLMAN	GS9	355.7	?	41 46	AGRCRP	?	AGR
ARS	PULLMAN	WA	PULLMAN	G10	6758.7	?	32 38	CRPASRGE	?	AGR
ARS	PULLMAN	WA	PULLMAN	G11	1792.7	?	41 47	AGRCRP	?	AGR
ARS	PULLMAN	WA	PULLMAN	GS5	5.82	?	32 46	AGRCRP	?	AGR
ARS	PULLMAN	WA	PULLMAN	GS8	308.7	?	34 41	AGRCRP	?	AGR
ARS	PULLMAN	WA	PULLMAN	GS4	942.7	?	31 38	AGRCRP	?	AGR
ARS	PULLMAN	WA	PULLMAN	GS2	27.6	?	31 46	AGRCRP	?	AGR

PRIMER TALLER NACIONAL DEINVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

SELECTION AND INSTRUMENTATION OF EXPERIMENTAL WATERSHEDS

Prof. Freeman M. Smith

Montevideo-Uruguay

SELECTION AND INSTRUMENTATION
OF EXPERIMENTAL WATERSHEDS

by

Freeman M. Smith
Professor of Watershed Sciences
Colorado State University
Fort Collins, Colorado U.S.A.

November, 1983

TABLE OF CONTENTS

	<u>Page</u>
Abstract	207
1. The Experimental Watershed	208
1.1 Purpose of Experimental Watersheds	209
1.2 Research Plans	211
2. Criteria for Selection of Watersheds	211
2.1 Selection Criteria	212
3. Selection	217
3.1 Hydrologic Properties of Soils and Vegetation	217
4. Watershed Instrumentation	218
4.1 Instrument Selection	218
4.2 Precalibrated Measuring Devices for Streamflow	219
Weirs	219
Flumes	221
Recorders	222
Accuracy Requirements for Flow Measurement	223
Recommendations	224
4.3 Precipitation Measurement	229
Point Measurements	229
Temporal Variability	230
Spatial Variability	230
Network Design	232
4.4 Measurement of Soil Water Content, Soil Water Potential	233
Neutron Probe	234
Networks for Soil Water Content Measurements	235
Soil Water Potential	238
4.5 Measurement of Meteorologic Variables	238
4.6 Instrumentation to Measure Sediment Yield.	239
Plots	239
Reservoirs	239
Suspended Sediment Sampling	240
Automatic Pumping Samplers	240
Bedload Sampling	242
4.7 Sediment Rating Curves	243
5. Conclusion	244
References	245
Appendix	250

RESEARCH ORIENTED WORKSHOP ON EXPERIMENTAL WATERSHEDS
U.S. - Uruguay Bilateral Cooperation

SELECTION AND INSTRUMENTATION OF EXPERIMENTAL WATERSHEDS

By

Freeman M. Smith
Professor of Watershed Sciences
Colorado State University
Fort Collins, Colorado U.S.A.

Abstract

The selection of watersheds for experimental purposes necessarily includes consideration of the research objectives, the costs of instrumentation and continued maintenance, and the hydrologic characteristics of each potential watershed. The selection process begins with the justification that the research objectives cannot be met without the use of an experimental watershed. Once the use of an experimental watershed is justified, the next step in the selection process is to obtain a commitment of funds not only for the initial capital investment for instrumentation but also for the long-term maintenance, data collection, processing, and analysis. After these important requirements are met, field reconnaissance is conducted to identify potential basins for experimental watersheds. The final selection of an experimental watershed is made on the basis that a stream-gaging site exists where total streamflow from the watershed can be accurately measured with confidence; that the variation of the hydrologic characteristics of the watershed are homogeneous; that the land ownership pattern will not result in the interruption of the experiments; and that the location and accessibility of the watershed present no problems to the long-term collection of high-quality data. Instrumentation is selected to specifically correspond to the measurement requirements of each research objective. Network design is also planned to satisfy the requirements of each research objective in terms of the spatial variation and the measurement precision.

1. The Experimental Watershed

The definition of an experimental watershed may have different meanings. Foebes and Ouryvaev (1970) sought to clarify the interpretation of the definition by distinguishing between "representative" and "experimental" watersheds. Paraphrasing, they proposed that a representative watershed be defined as a basin that was representative of a hydrologically homogeneous region and was selected for long-term research.

The primary research objectives for a representative watershed included fundamental research (1) on the hydrologic processes and the research methodology itself, (2) on the hydrologic effects of natural (long-term) changes, i.e., changes in climate, plant succession, fires, etc., (3) on the methodology of hydrologic prediction, and (4) on the methodology for extending hydrologic records.

The authors proposed that an experimental watershed be defined as a basin which are relatively homogeneous in its physical characteristics, soils, and vegetation and was selected to study the effect of deliberate (cultural) modifications on the hydrologic behavior of the watershed. In addition to the research objectives for representative watersheds, the distinguishing objective of research on an experimental watershed was to study the hydrologic effects of cultural changes, i.e., land use, land management, and use of the water resource itself, i.e., irrigation diversions, pumping from aquifers, artificial recharge, etc.

In comparison, representative watersheds are selected as a sample of a hydrologically homogeneous region and may vary in size, but are generally less than 3000 km² in area. On the other hand, experimental watersheds are selected on the basis of their own relatively homogeneous features. Although they should be selected as a sample of a more extensive soil-plant

community, an experimental watershed is not intended to be a sample of a hydrologic region. As such, the size of an experimental watershed is rarely larger than 4 km² in area.

Foebes and Ouryvaev's definitions distinguished between representative and experimental watersheds on the basis of purpose, research objective, and size. In this paper, experimental watershed is intended to mean a small relatively homogeneous basin selected for basic research on the hydrologic effects of cultural changes. This definition places no restrictions on the research methodology or the design.

Experimental watersheds are very expensive research tools. Even small watersheds can require a significant outlay of capital to adequately instrument. Once instrumented, the continuing collection of data, the maintenance of equipment, and the analysis of the data represent sizeable costs in technical and professional salaries. Convincing arguments must be made that experimental watersheds are necessary to address the questions posed. The foregoing bears careful consideration before a decision is made to initiate watershed experiments. Once a decision is made, the financial and professional commitment must be guaranteed if the research is to be successful.

1.1 Purpose of Experimental Watersheds

Obviously, experimental watersheds are watersheds used for experiments. But what kinds of experiments justify the use of such an expensive tool? The use of an experimental watershed as a unit of study is justified when the hierarchy of the answer we are seeking is only found at a system-level whose complexities and scale are commensurate with the research objectives.

Watersheds are complex systems. They include not only the physical (hydrologic) system, but also the biological system and the cultural system within their boundaries. This interrelated set of physical, biological, and cultural systems operating within a watershed constitutes an ecosystem. If (1) the questions involve the effect of an experiment on the water, the sediment, or the chemical outputs at an ecosystem level and (2) the answers are meaningful only at a scale as large as a first-order watershed, then the experimental watershed is the appropriate unit of study.

Watershed experiments have proved invaluable in determining the effect of timber-harvesting, species conversion, and afforestation on water yield and timing (cited in Hewlett, Lull, and Reinhart, 1969). Also, the effect of surface mining on stormflows and peakflows has been quantified using paired watershed analysis (Bryan and Hewlett, 1981). Experimental watersheds were the basic units of ecosystem study for investigating the nutrient balances of forested watersheds (Bormann, F.H. and G.E. Likens, 1967). More recent nutrient-balance studies of small watersheds have been reported by Post (1982) and Riekert (1983).

For each of these examples, plot studies would have been inappropriate (or impossible) because the characteristics of interest were outputs of a system rather than the result of a single process. For example, although we might attempt to study the effect of timber-harvesting on water yield on a plot, we would only be able to solve the water balance for the plot. We could not determine if an increase in water yield actually occurred, how much more water would appear downstream, or when it would arrive.

Likewise, if we had studied the effect of vegetation removal on nutrient losses, we may have been able to detect changes in nutrient concentrations in the soil and soil solution, but we could only speculate on whether or not the changes we measured would be detected in streamflow

as actual losses. Plot studies short-circuit the complexity of processes that operate on system outputs.

1.2 Research Plans

Clear, concise, unambiguous research plans are rarely written for watershed research. This is scientifically dangerous. Studying a system requires a strategic, organized research plan. Without one, research results may be incomplete, absent, and fail to converge to a better understanding of how the system operates and how the system's behavior is changed by a cultural change. Because watershed research is expensive and long-term, research must be carefully planned and carried out to avoid the political criticism of the research as a "collection of interesting studies that could have been done anywhere, much cheaper."

2. Criteria for Selection of Watersheds

Problem and Cost Criteria

Several different kinds of criteria must be defined before the selection process begins. The criteria to justify whether or not experimental watersheds are needed to answer the questions must be met.

- *Are the questions system-level questions?
- *Can the questions be answered using any other methodology?
- *How will the research findings be used?

If the careful consideration of the first criteria are satisfied, the next criteria are purely economical. The criteria are directly related to

the financial commitment that must be given to initiate, maintain, and conclude an experimental watershed study.

- *Are there sufficient capital funds to install the minimum set of instruments?
- *Will funds be available to assure that the data are collected and the instruments are calibrated?
- *Will funds be available to tabulate and analyze the data, concurrent with its collection?
- *Can it be assured that if the principal investigator leaves, another will assume responsibility for the experiment?

All of these questions must be in the affirmative, with full recognition that perhaps a decade will pass before the experiment is concluded.

The answers to the first three questions depend of course on the size of the watershed, i.e., a small watershed will require fewer raingages and a smaller runoff measuring device than a large one. Likewise, the volume of data to be tabulated and analyzed will be smaller. At this time, it is well to prepare a realistic working budget.

2.1 Selection Criteria

Experimental watersheds (a pair, for example) should be chosen to be as similar as possible. This means that to the extent possible, the size, shape, orientation, relief, topography, geology, soils, vegetation, and history of past use of both watersheds must be as similar as possible. Both within and between the two watersheds, the variation of such things as topography, and the pattern of soils and vegetation should be "homogeneous".

The reconnaissance for possible experimental watersheds is best begun by studying any available aerial photographs of the general area. Recent aerial photos are preferred. Black and white panchromatic photos exhibit a variation in tone and texture that make it relatively easy for someone experienced in photo interpretation to recognize characteristic patterns of soils and vegetation. Viewing stereo-pairs allows one to judge the watershed divides as well as to examine stream channels.

Color aerial photos provide subtle shades and contrasts that are useful in differentiating areas of different plant or vegetation density. With color photos, seasonal differences of vegetation are much more pronounced than they are in black and white. False-infrared film produces photos in which the vegetation is red or bright pink. The intensity of the color depends on both the density of the vegetation and the level of transpirational and photosynthetic activity. Riparian vegetation, meadows, swales, and springs usually stand out dramatically. Rock outcrops and bare soil are equally distinct. LANDSAT imagery, while useful for large area comparisons, is of less use for examining surface details.

And just what should one look for in aerial photographs? Once the potential watersheds have been located, pay attention to their drainage features, i.e., gullies, drainage pattern, and drainage density. Gullies may generate sediment that confounds interpretation. They may also grow considerably during the period of the experiment.

Drainage patterns, i.e., dendritic, rectangular, trellis, etc., reflect the (non)uniformity of the underlying geologic structure (jointing and fracturing). Dendritic drainage patterns suggest a random evolution of the stream network. Rectangular and trellis drainage patterns suggest a non-random evolution along joints or contacts, where streamflow losses (or gains) might occur.

Conspicuous alignments, of either stream channels or vegetation, or conspicuous discontinuities are indications of possible faults. Stream channels themselves often follow the lines of the less-resistant fault zones. Potential sites for streamgaging locations must be carefully examined in the field to avoid serious leaks under or around the structure.

When examining aerial photos, attention should be given to all cultural features, i.e., trails, roads, fences, small reservoirs, abandoned agricultural fields, irrigation ditches, etc. Whether or not these features disqualify a potential watershed will have to be judged in the field.

After all potential watersheds are located and marked on a map, the important question of all-weather accessibility: to the watershed; to the potential stream-gaging sites; and within the watershed must be realistically evaluated. Those watersheds that present serious problems of access should be eliminated for the time being.

The next step is to make a rapid title-search to determine land-ownership, and the existence of any easements, right-of-ways, leases, or mineral exploration rights on the potential watersheds. Control of land use for the duration of the experiment is essential. Cooperation with a single landowner is possible but cooperation with several landowners becomes tenuous. The exercise of a right-of-way or an easement, during the experiment period, is disastrous. At this point, any watersheds with patterns of land ownership that might create future problems should be relegated to the end of the list.

If available, geologic maps should be studied to confirm that the potential watersheds are underlain by the same rock type. If the rock type is sedimentary, be alert that faulting and folding may create possible groundwater divides that extend beyond the topographic divides. Tilted

strata may cause groundwater to enter (or leave) the watershed, making it impossible to be sure the water balance closes. Faults indicated on the map should be examined in the field to determine whether or not they are zones of significant water loss.

Topographic maps supply a wealth of both quantitative and qualitative information. Range in elevation (relief), watershed area, slope steepness, slope length, and channel lengths and slopes can be easily measured if the map is at a suitable scale. These dimensions and their various combinations provide further insight to the similarities and differences among potential watersheds.

Qualitative information such as the pattern of the contour lines, suggest the relative smoothness or roughness of the surface. Abrupt changes, and rough topography suggest air turbulence, which calls for special attention in the location of instruments. The same roughness sometimes suggests a mosaic of microclimates, which can be verified with the patterns of vegetation on the aerial photograph. (Snow distribution is particularly sensitive to the topography-wind direction interaction, i.e., bare windward slopes and snowdrifts on lee slopes.) If stream classifications (ephemeral, intermittent, perennial) are indicated on the topographic map, the relative importance of baseflow can be judged.

Field reconnaissance is the final stage of inspection. Because the existence of a sound stream-gaging site determines whether or not a watershed can be used, the main stream channel should be examined first. Desirable characteristics for sites for permanent stream-gaging structures are locations where the channel dimensions are controlled by bedrock and where the channel is relatively straight. Above all, the site should be one where careful examination of the channel and banks assures that a structure can be built or installed with cutoff walls (below the channel

and into the banks) that will prevent significant leaks under and around the measuring device. The judgement of a field geologist is valuable.

At the same time the channel is surveyed for possible gaging sites, paying attention to the channel configuration, the size distribution of the bed material, and the bank material lends insight to whether or not the channel is stable. Stable channels are relatively straight, have a predominance of large (cobble-size or larger) material in the bedload, and have banks of boulders or bedrock. Unstable channels are sinuous, have a predominance of small (gravel-size or smaller) material in the bedload, and have banks in unconsolidated material. Streamgaging sites in unstable channel reaches should be avoided.

A final criterion to check before leaving a possible stream-gaging site is the accessibility for vehicles. Excavation, construction, and installation of a weir or flume is a major project. Accessibility is essential, not only for construction, but also for checking, servicing, maintaining, and calibrating the weir or flume for the duration of the study.

If a watershed has a suitable streamgaging site, the reconnaissance can continue. Field checking the soils, vegetation, anomalies, indicators of past history, (plant successional stages, fires, etc.), past use (timber-harvesting, grazing, agriculture, etc.), and present use will provide information for final selection.

Note: Throughout the preceding discussion of the watershed reconnaissance procedure, it is to be assumed that the reconnaissance is conducted by a team of resource scientists with expertise in soils, geology, plant ecology, and hydrology. All members of the team keep notes of their observations on each watershed.

3. Selection

After the field reconnaissance has been completed, the potential watersheds remaining after outright elimination of the others are compared for possible pairs on the basis of overall similarity (for a paired watershed experiment). A ranking of "best pairs" is made by consensus of the reconnaissance team. The final choice of which pair will be selected should be made on the basis of good stream-gaging sites, all-weather access, and (the unscientific assessment of) "practicality". The last item simply emphasizes that the installation of the instruments, the ensuing field work, the servicing, maintenance, and calibration, and the application of the treatment must be practical as well as scientific if the necessary quality of data is to be obtained.

3.1 Hydrologic Properties of Soils and Vegetation

Soil and vegetation inventories for experimental watersheds are not simply "soil surveys" and "vegetation surveys". The objective of a soil or vegetation inventory for an experimental watershed is to quantitatively describe the soils and vegetation in terms that are directly meaningful to their role in hydrologic behavior.

Soil profile descriptions are useful for identifying soil types and relating them to soils that are found elsewhere, but more important are properties such as bulk density, soil water retention curves, surface texture, etc., to name a few. Soil surface properties such as total cover, including plant canopy cover, surface cover, rock fragment cover, and microfloral crusts, is important.

Vegetation properties that influence hydrologic processes include leaf area index, vertical (above and below ground) biomass distribution, and

interception storage properties of the litter. When crops are under study in an experimental watershed, it is essential that relations between crop measures of hydrologic importance and common measures of crop yield are developed. For example, what is the relation between leaf area-index and crop phenology? Units of harvest? One-to-one relations between experimental measures and agricultural measures are necessary to relate hydrologic properties to more common crop information.

4. Watershed Instrumentation

Before discussing the various kinds of instruments, it is well to point out an all too often mistake. Ultimately, research results are intended to be applied at other locations. Therefore, it is important to be able to relate experimental measurements to "standard measurements" in the national network. Accordingly, a standard weather station should be located in the experimental watersheds immediately after they are selected. Too often this is neglected.

4.1 Instrument Selection

The type, precision, and number of instruments needed for an experimental watershed are directly related to the research objectives. Therefore, no attempt will be made to recommend the instrumentation required for any specific research objective. In the following section, comments will be made about instruments and networks as they apply to streamflow, precipitation, soil water, and sediment.

All measuring devices used in watershed experiments should be treated as high-precision instruments, whether or not they really are. They should be carefully installed, carefully calibrated, carefully maintained, and

faithfully recalibrated. Too often instruments are purchased, installed, and neglected. Research conclusions under field conditions are arrived at only through the interpretation of high-quality data. The point of maintenance and (re)calibration cannot be over-emphasized. Will our interpretation (several years later) be due to an instrument whose calibration has drifted or a real treatment effect?

4.2 Precalibrated Measuring Devices for Streamflow

Watershed experiments require the continuous measurement of streamflow. The research objectives dictate the specific accuracy requirements for flow measurements, i.e., low flow, peak flow, water yield, etc. Precalibrated devices are recommended because of their known hydraulic characteristics. Following are brief discussions of the principal devices and structures used to measure streamflow in the U.S. For additional sources of information, the reader is referred to Foebes and Ouryvaev (1970) and USDA (1979).

Weirs

Weirs are essentially dams that pond the streamflow and the water "falls" over the crest. The approach velocity of the water must be near zero, and the distance for free-fall below the crest must be high enough to prevent submergence. (Submergence means that the flow measurement at the crest is influenced by the streamflow in the channel immediately downstream from the weir.) If submergence occurs, the head-discharge relation is no longer unique. Weirs are not recommended for measuring streamflow that carries any significant sediment concentration or debris.

Sharp-crested weirs include the rectangular weir and the v-notch weirs. For rectangular weirs, the crest is horizontal and low-flow

measurements lack accuracy. V-notch weirs have a notch as the crest, which is usually 90° , but weirs have been used with notches of 120° , 60° , 45° , and $22\ 1/2^\circ$. Some v-notch weirs are "compound" with the lower part of the notch at a smaller angle, to increase the accuracy of the measurement of small flows.

Sharp-crested weirs are called "sharp" because the crest is usually made from a steel plate and is beveled to produce a sharp edge. If sediment or debris dulls the edges of the crest, the accuracy is not maintained. Where debris, sediment, or ice is carried by the stream, broad-crested weirs are recommended for measuring runoff over long periods. The crest of these weirs is usually concrete.

In general, the ratings of both sharp-crested and broad-crested weirs are sensitive to approach velocity and submergence. Although corrections can be made for both approach velocity and submergence, special computations are necessary and accuracies are reduced. To minimize the effect of approach velocity, sittings should be made only in stable stream sections. Where sediment transport is high, this may not be possible. Stilling-ponds are sometimes built to assure low (zero) approach velocities. However, if sediment fills the stilling-pond, the problem continues to occur.

To measure streamflow that carries high sediment loads under varying conditions of approach velocity, the drop-box weir was developed and field-tested (Johnson, Copp, and Tinney, 1966). A drop-structure, as an integral part of the weir, forces the flow over the back of the box or over the sills on the sides of the box. The turbulence suspends the sediment as it flows through the control section. (Note that although called a "weir", the drop-box weir is actually a hybrid between a weir and a flume.)

Prototypes of the drop-box weir have been designed to measure discharge from watersheds as small as 100 ha to larger than 10,000 ha.

Flumes

Flumes are streamflow measuring devices that utilize the principle of critical-velocity. Velocity is controlled by forcing the flow through a constriction that is designed to attain critical velocity. The distinct advantage of flumes over weirs is that flumes are not as sensitive to submergence and the difference in upstream and downstream water levels can be much smaller than that required for weirs. Another advantage of flumes is their ability to handle sediment and their tendency to be self-cleaning. However, accuracy is lost if velocity is reduced in the measuring section and sediments are deposited.

H-flumes (HS, H, HL) are prefabricated devices that can be made to accurately measure flows from $.004\ \text{l sec}^{-1}$ (HS) to $3\ \text{m}^3\text{sec}^{-1}$ (HL). However, because they are 3-dimensional, they must be made in strict accordance with the designs. The larger H-flumes and the HL-flume are usually constructed in place.

The Parshall flume is another 3-dimensional flume that can be prefabricated. This flume has a long history of use in the U.S., particularly for the measurement of water in irrigation systems. The flume has a relatively low head-loss and, because of its long use, the corrections for submerged flow are well-known and can be found in tables.

There are virtually hundreds of special-design or modified stream-gaging devices. Two of the more interesting ones were designed to measure extremely different flow regimes. For the Walnut Gulch watershed in southeastern Arizona, a super-critical flume was designed to measure both the volume and peakflow of flash floods resulting from high intensity

thunderstorms typical of this semi-arid region. Debris, high suspended sediment concentrations, and high bedload transport are the rule for these ephemeral streams. The structure is concrete, built in place. Peakflow capacity is $640 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$.

For the Reynolds Creek watershed in southwestern Idaho, research objectives required accurate measurement of peakflows from intense thunderstorms and rain-on-snow events, as well as low flows from seasonal snowmelt. To meet these dual measurement requirements a self-cleaning overtred v-notch weir (SCOV) was designed that had 2 control sections, the lower v-section to measure low flows and a trapezoidal section to measure peakflows. Design flows for this large concrete structure are $.03 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ for low flows and $600 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ for peakflows.

Recorders

Head-measurements are made in stilling-wells so the stage-discharge relation can be used to convert water-level measurements to discharge. Float-actuated water-level recorders are by far the most common. The records are either the strip-chart or the digital-punch type. The strip-chart record is a pen-trace and the digital-punch record is a paper tape in which coded holes are punched to register the head-measurement.

Strip-charts must be reduced by hand or with an analog digitizer. Punched tapes must be read on a special reader. With special equipment, either type of record can be automatically reproduced on computer cards or magnetic tape. The recent trend is to use automatic recorders that digitize the data directly onto magnetic cassettes-tapes. Beware of new-fangled contraptions. At least have an old-fashioned pen-track backup (author's personal opinion).

Accuracy Requirements for Flow Measurement

The easiest part (selecting an appropriate weir, or flume) has already been written. The most difficult part of selecting a weir or flume to meet the research objectives is in determining just what discharge rates will be produced by an un-gaged watershed (high accuracy at peakflow? low flow? water yield?). If no local streamflow records are available, then the problem becomes one of estimating not only the range of discharges to be expected, but also the frequency of discharge classes in relation to the total annual or seasonal volume (flow distribution). If a large percentage of the annual water yield is accounted for by discharge rates in a given range, i.e., low flows, then the measuring device must be most accurate in that range of discharge. (Remember that the accuracy of precalibrated streamflow measurement devices is proportional, not absolute.)

There is no adequate methodology for estimating the flow distribution of un-gaged watersheds. Estimates of peakflows for different recurrence intervals can be made with a variety of equations, i.e., the rational type. Usually these require some knowledge of the recurrence intervals for different rainfall intensities. In the absence of rainfall intensity measurements, rules-of-thumb prevail. Despite all arguments, these methods provide a useful beginning even though they assume overland flow.

If it is possible to locate floodplains and determine the bankfull depth confidently, then bankfull discharge can be estimated by the Manning equation. The recurrence interval of bankfull discharge is 1.5 years. (Dunne and Leopold, 1978). Further slope-area discharge calculations for channel cross-sections at stage heights of 1.2, 1.4, 1.7, and 1.8 times the bankfull depth correspond to recurrence intervals of 5, 10, 50, and 100 years.

Methodologies for estimating low flows have even less to offer. Even though runoff records from plots may be available, how to transfer this information to larger areas is poorly understood. Therefore, in light of the uncertainties of estimating the critical characteristic flows for an ungaged watershed one alternative would be to actually measure the discharge for the stream in question for a full season or year and plot the flow distribution. While the measurements for a single season are always atypical, the form of the flow distribution curve is more conservative. Judgement of the class of discharge that must be measured most accurately can be made from the graph.

Another alternative would be to make a professional judgement, based on all surrogate information. In any case, the streamflow measuring device should be selected to reliably measure the changes expected to occur with the effect of the treatment. The problem of predicting the behavior of ungaged watersheds is related to the problem of transferring information obtained at one scale to another larger scale. This is thoroughly discussed in a following paper in this workshop.

Recommendations

With such a range in the requirements for measuring streamflow from different watersheds, each situation must be studied on a case-by-case basis, considering the specific site and sediment conditions. Nevertheless, some general guides are provided. For watersheds generally smaller than 10 ha, the H-flumes (HS or H) are recommended. Operation is optimal with free-fall conditions, but a loss of only 1 percent accuracy occurs at 30 percent submergence. The H-flumes have largely replaced the Parshall flumes because they can tolerate higher sediment loads without

loss of accuracy. Prefabrication makes these flumes ideal for small watersheds.

Watersheds between 10 and 100 ha are usually equipped with broad-crested 120° v-notch weirs if sediment loads are not extremely high. Large Parshall flumes are sometimes used for watersheds in this size range, but have very poor accuracy for low flow. Where both peakflow and low flow need to be measured under high sediment loads, the drop-box weir is ideally suited. Where sediment load is high, and abrasion is severe, the weir should be made of stainless steel, which is expensive.

For watersheds larger than 100 ha but smaller than 1000 ha, the broad-crested weir and the drop-box weir are preferred for moderate and extreme sediment loads, respectively. For high peakflow accuracy for ephemeral streams with high sediment transport, a super-critical flume, such as the one designed for the Walnut Gulch watershed performs well. Artificial control sections, i.e., a concrete sill extending across the channel or natural control sections, i.e., exposed bedrock, are often gaged for watersheds of this size. Discharge measurements for both the artificial and the natural control sections have limited (unknown) accuracy.

Watersheds between 1000 and 10,000 ha in area are usually equipped with artificial control sections, or natural control sections are used. For watersheds larger than 10,000 ha, natural controls are the rule. The super-critical flume at Walnut Gulch in Arizona and the SCOV weir at Reynolds Creek in Idaho are exceptions. Figure 4.1, reproduced from USDA (1979) can be used to help select streamflow measuring devices.

The importance of carefully selecting a site for the streamflow measuring device cannot be over-emphasized. Any potential accuracy of the

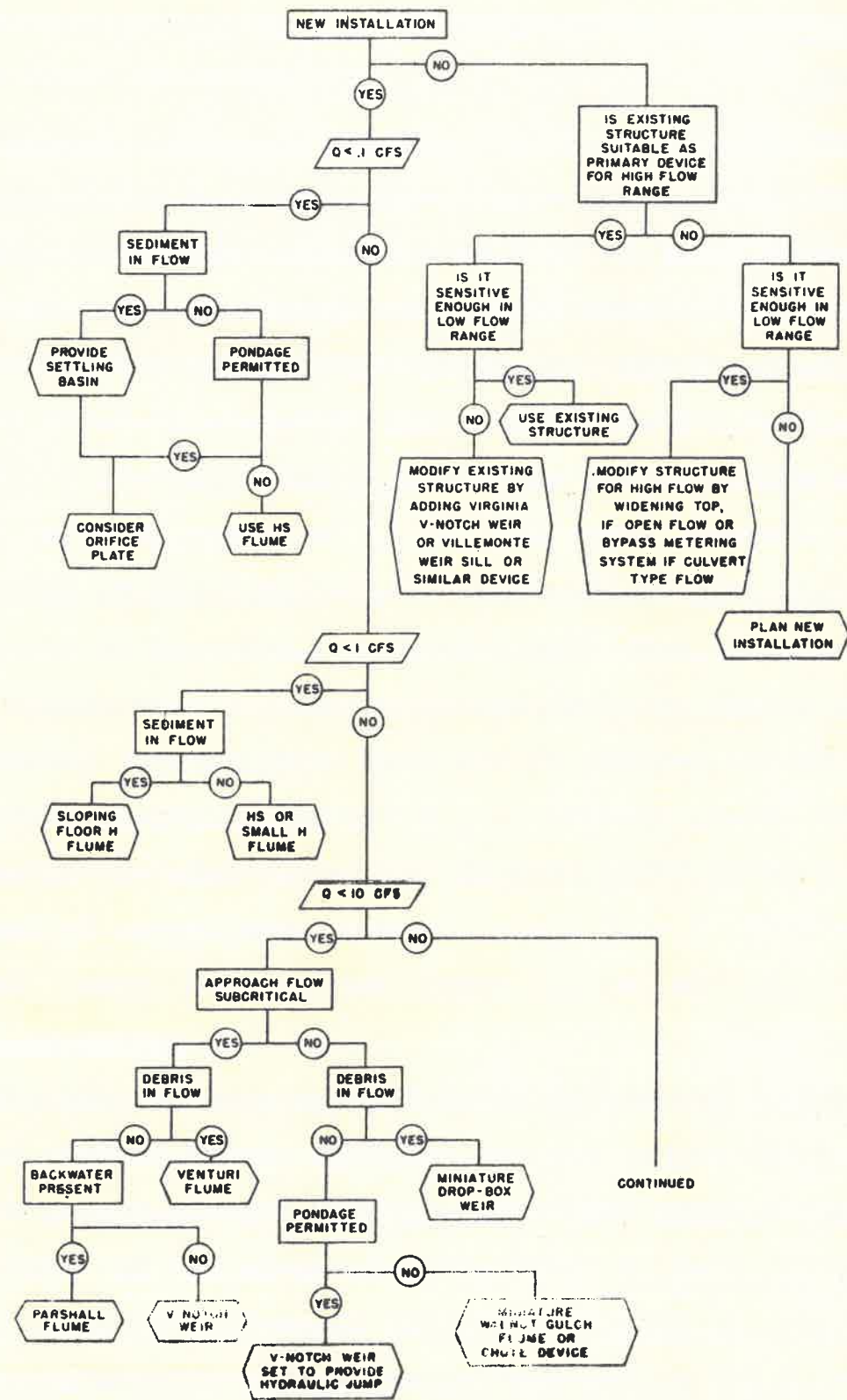


Figure 4.1. Selection guide for measuring runoff (USDA, 1979).

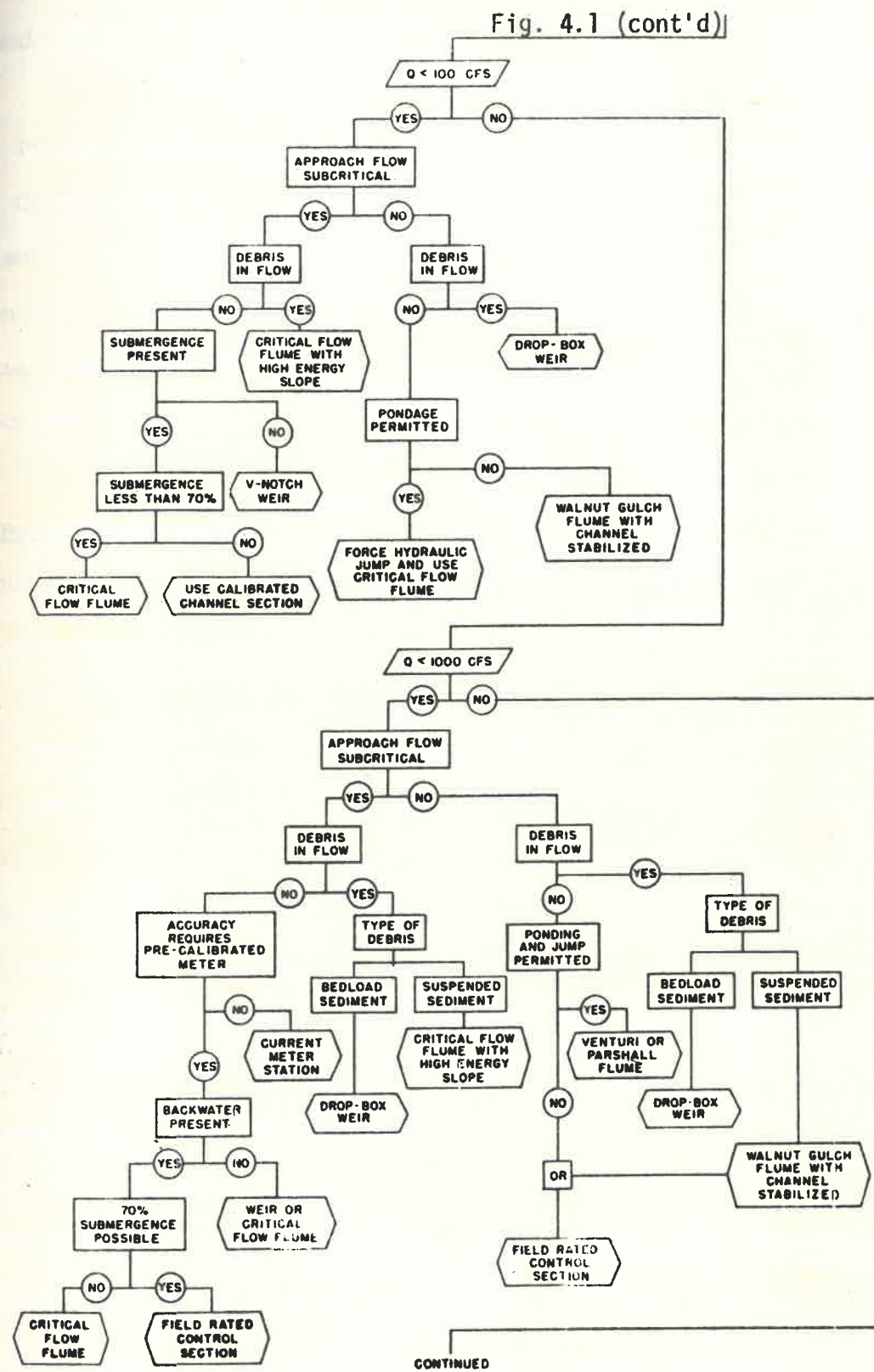


Figure 4.1. Selection guide for measuring runoff. (cont'd)

instrument will lose its significance if unmeasured water passes under or around the structure.

4.3 Precipitation Measurement

Considering that precipitation is one of the principal driving variables of the watershed system, its measurement warrants careful attention. Once again, the research objectives determine temporal and spatial resolution requirements. Unlike streamflow-measuring devices, the choice of a precipitation gage is made with less uncertainty.

Point Measurements

Before going further, the question of point rainfall must be addressed. Does the amount of rain caught in a raingage represent the amount of rain that reaches the mineral soil? Obviously, it doesn't. Numerous studies have shown the effect of wind on raingage catch and several studies have shown the effect of gage height on the amount of rainfall received at the surface. For raingages unprotected by their surroundings, shields are recommended to minimize the effect of the wind.

Further, for raingages in open sites, it is known that pit gages at the surface receive between 8 and 15 percent more rain. Because a complete network of pit-gages is impractical, usually a separate study is conducted to determine the adjustment factor that is applied to the network gages. Since the adjustment factor varies with height of the orifice of the network gage, all network gages should be installed at a standard height (the same one that was used in determining the adjustment factor).

Fig. 4.1 (cont'd)

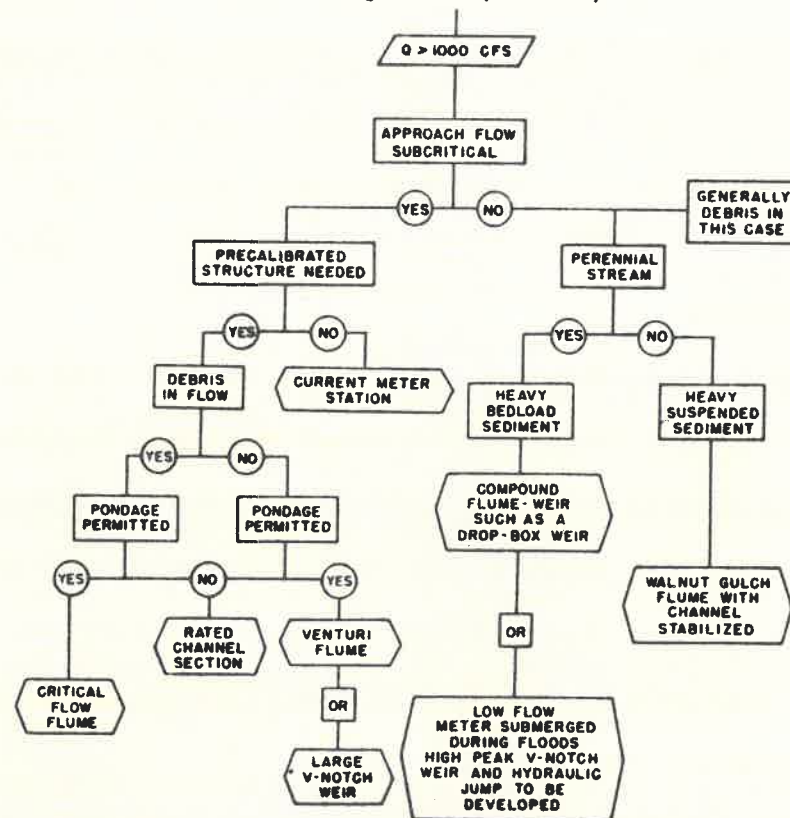


Figure 4.1. Selection guide for measuring runoff (cont'd).

Temporal Variability

Temporal resolution refers to the time-interval between measurements. For example, the research objectives may call for daily amounts, monthly amounts, or seasonal or annual totals. Manually-read or recording raingages with very slow rotation speeds (once per week) will suffice for these objectives. However, if the time interval of interest is one that is small enough to determine instantaneous rain rates, or multiples for 5-minute intervals up to 1 hour, only recording gages can be used. The chart rotation speed for a pen-trace recorder or the sampling time for a digital recorder becomes important.

For hourly rain rates, the 24-hour chart rotation speed is adequate. Intensities as high as 75 mm hr^{-1} for 30-minute intervals can be determined with ideal chart traces with a 24-hour rotation, i.e., a fine, crisp pen-trace. Field experience has proven that pen-trace width, vibration, and relative humidity prevent the ideal conditions from ever being met. Intensities lower than 75 mm hr^{-1} can be adequately determined on 24-hour charts, but for higher intensities for intervals as short as 15 minutes, the 6-hour rotation is recommended. Strip-chart and digital weighing-raingage recorders are recommended if rainfall intensities greater than 75 mm hr^{-1} for short intervals are anticipated. Tipping-bucket gages are adequate for rain rates less than 75 mm hr^{-1} . Instantaneous rain rates can only be measured with very specialized equipment. These measurements have only been made in studying the problem of micro-wave communication networks (Freeney and Gabbe, 1969).

Spatial Variability

Spatial variability must be sampled with a network of raingages. The density of gages depends basically on which of two general approaches is

taken, the index approach or the absolute estimate approach. The index approach uses precipitation measurements as indexes to intensity or amount. No assumption is made that the measurement provides an estimate of the rate or the amount. The important assumption is that the measurements made are highly correlated with the variable being studied. Gages are located at sites to maximize the correlation. For example, in a study of runoff, gages would be located in locations where the highest runoff rates would be expected.

A good example of the index approach is the method used for measuring snow-water equivalent to predict seasonal runoff volume. A snow-course is carefully located in an opening which affords protection from the wind in all directions. The objective is to select a site where the snow accumulation is uniform and varies "proportionally" with water yield from year-to-year. The snow course snow-water equivalent bears no physical relation to the runoff volume, but it behaves as an index of the total amount of water stored on the watershed. Since index gages only have the requirement to be correlated with the variable of interest, fewer gages are required in such a network.

The absolute estimate approach is much more demanding. The objective of this approach is to measure the actual quantity or rate of precipitation in such a way that an estimate of the amount or intensity is physically related to the variable under study. For example, if the simple water-balance equation; $P - L - RO = 0$ (where P is the annual volume of rainfall, L is the volume of all losses, and RO is the volume of runoff), is being studied, then the network must be designed to provide an estimate of the actual mean value with a given precision.

Network Design

During the International Hydrologic Decade, concerted efforts were applied to the design of hydrometeorological networks. Many studies produced information that had application at the national level, however, fewer studies dealt with areas less than 250 km². The most pertinent principles for network design have come from research and experimental watersheds with very high density networks.

Basic principles for small watersheds are (1) the network spacing should be regular, avoiding wind-exposed or lee sites, (2) the network should be centered with a gage located near the geometric center of the watershed, and (3) the network should extend beyond the boundaries of the watershed at least by one raingage. The last requirement allows for reliable location of isohyetal lines near the watershed divide.

The actual spacing between raingages depends on the research objective in relation to (1) the precision required for the estimated mean and (2) the time-period of interest, i.e., hourly, daily, weekly, etc. The longer the time-period, the more spatial averaging naturally occurs. These two requirements are, in turn, affected by the predominant storm type. Watersheds in climatic areas that are dominated by frontal and orographic storms do not require network densities as high as those dominated by convective storms.

The minimum number of recording raingages for research and experimental watersheds of different areas are given in USDA (1979):

<u>Watershed Area (km²)</u>	<u>Number of Gages</u>
20	2
40	3
250	4
1000	10

The number of raingages recommended is on an areal basis. In addition to area, (1) the storm type, (2) the form of precipitation, i.e., rain or snow, (3) the topography, (4) the aspect, and (6) the season must be considered.

Considerable thought has been given to methodologies for designing the "optimal" network. Earlier work was based on calculating the linear correlation coefficient (r) between gages in an existing network and plotting the correlation coefficient as a function of the distance separating the raingages (Hershfield, 1965). The distance at which the r-value fell below a chosen criterion, i.e., 0.8, determined the desired spacing. Similarly, the standard error of estimate between gages has been used to appraise network densities (McKay, 1965).

The correlation-distance and the standard error of estimate-distance relations change, of course, with the variable, i.e., storm total, peak n-minute intensity, daily, monthly, or annual totals. Plotting the distance between raingages (that corresponds to the accepted level of the correlation coefficient or the standard error of estimate) as the radius of a circle from each gage reveals redundant gages and holes. Gages are added or removed from the network accordingly. The most recent work on optimal network design is reviewed by Moss (1982).

4.4 Measurement of Soil Water Content, Soil Water Potential

To solve the water-balance equation for a watershed, to the extent possible, it is important to independently measure as many of the individual terms in the equation as possible. Soil water content, or more specifically, changes in soil water content, can be measured directly with the neutron probe. There are a variety of methods that can be used to measure soil water content, (Shaw, M.D. and W.C. Arble, 1959), however, the

neutron probe is by far the best instrument for repeated measurements of soil water content. The present improvements in circuitry, rate-meters, and counters have greatly improved their field reliability since their introduction.

Neutron Probe

The installation of neutron probe access tubes presents real problems in rocky soils. There are no solutions other than trying again in a slightly different location. Hand-augers or truck-mounted soil coring tools are usually used to prepare the hole. Bit sizes should be selected to assure as tight a fit between the soil and the access-tube as possible. In rocky soils, larger-sized holes usually result and back-filling with washed sand is the only practical solution to avoid air-gaps between the soil and the tube.

Opinion varies as to whether or not the bottom of the access-tubes should be sealed. Access tubes located where soil water may be under positive pressure should be sealed, unless one is interested in using the access tube as a piezometer. The top of the access-tube should be covered to prevent water from entering the tube. Some condensation may naturally occur inside the tube. This should be swabbed out before readings are taken. Finally, the length of tube that projects above the soil surface should be cut at the same height above the soil surface for all tubes, so measurement depths below the surface are standardized.

A principal drawback of the neutron probe is the problem of measuring the soil water content in the top 15 cm of soil. Neutron loss occurs this close to the surface. To be able to use the neutron probe measurements for this shallow layer, bulk density and gravimetric soil water content

measurements are made to develop the correction for the neutron probe readings. This must be done for each of the different soil types.

Networks for Soil Water Content Measurements

The dynamics of soil water account for both vertical variations in the profile and spatial variations within the watershed. Natural variations (both vertically and horizontally) occur within "homogeneous" soil types due to variations in soil development processes and physical properties. Networks of neutron access tubes are designed to provide measurements from which "true" estimates of average soil water content, at a given depth, or for the entire depth of the soil mantle.

Note that the following comments, regarding a network of stations for measuring soil water content, can be applied to watersheds of different sizes. However, if the watershed includes a large variety of different soil types, trying to establish and maintain an overly ambitious sampling network is a mistake to be avoided initially. The time required to take readings at several depths for many stations and return to the first station within a given time interval, i.e., weekly, can easily become impossible.

The first step in establishing a network is the delineation of sub-areas which are homogeneous with respect to soil water dynamics...not only soil types. Usually soil types are used to delineate homogeneous areas but depths and hydrologic properties of soil horizons (particularly the A_{00} , A_0 , A_1 , A_2 , and A_3 horizons) should be homogeneous. Other criteria such as slope, aspect, clay content, bulk density, etc., should be considered. A rule of thumb in delineation is, when in doubt, separate sub-areas, don't combine. (Homogeneity between sub-areas carries no penalty, but heterogeneity within sub-areas does.)

Once sub-areas are identified (and mapped), the precision of point measurements must be estimated, i.e., the coefficient of variation of the soil water content measured at one station, at one depth. For the neutron probe, this is small, and depends on the water content, the counting time, or time until the rate-meter stabilizes. The estimate of the coefficient of variation does not have to actually be determined by measurement. Estimates may be taken from previous studies or from the literature (for exactly the same kind of neutron probe, i.e., source strength, dimensions, location of detector, etc.) The coefficient of variation of a point measurement establishes the smallest significant change in soil water than can be detected.

Neutron access tubes can be installed to any practical (feasible?) depth. Soil water content at successive depths can be measured to determine the vertical distribution of soil water and the changes in the soil water profile through time. Before installing access-tubes, a decision must be made on how deep the access tube should be installed. The decision should be based on (1) the vertical distribution of root biomass, (2) the depth of "usual" hydrologic activity (excluding unusually "wet" or unusually "dry" seasons or years) and (3) the importance of measuring soil water profiles during unusually "wet" or "dry" periods.

One answer, of course, is to install the access tubes "as deep as possible." Afterwards, measurements can be limited only to those depths deemed important a posteriori. However, the cost of aluminum access tubing must be considered. A more realistic approach is to decide the depth of primary interest and add 15 cm. Install a few of the tubes to greater depths (at least 1 in each sub-area) for occasional measurement.

The number of neutron access tubes for the watershed is sometimes distributed in proportion to the relative surface area of each sub-area.

However, with respect to hydrologic response, a better proportioning is accomplished by distributing the number of access tubes on the basis of soil volume, i.e., area x soil depth. The proportions of the total soil volume of the watershed which are represented by each sub-area are the weights used to determine the number of access tubes for each sub-area. For example, 3 hypothetical sub-areas (A,B,C) represent .75, .20, and .05 of the total soil volume on the watershed.

The number of samples (access-tubes) required to measure the soil water content (at the same depth) for a given sub-area is determined from an estimate of the standard deviation of population of measurements for the sub-area, the allowable error, and the desired confidence level. The sample size is calculated using formulas in any basic statistics text. Based on the sample size determined for 1 sub-area, the number of access-tubes for the other sub-areas is calculated using the weights for the relative soil volumes. For example, if 12 access tubes are needed for the sub-area A (representing .75 of the total soil volume), then 3 would be needed for sub-area B and 1 for sub-area C. Notice that the number of sampling points required is dependent on variation, not on absolute area.

As an aside, even though statistical methods are available to determine the sample size required to estimate a mean value (or difference) within a specified interval, the required number of samples specified by a formula is often absurd (practically). In these cases, a decision is usually made to measure soil water as an index rather than an estimate of the absolute value or absolute change.

The spacing of points for soil water measurement throughout sub-areas should be regular rather than random. Trends and differences within sub-areas are more efficiently defined by systematic sampling (Tyler, G.W., 1953, Cochran, W.G., 1946). The basic grid may be square or hexagonal if

the direction of a suspended trend is unknown or rectangular if the direction of a suspected trend is known (long axis perpendicular to the direction of the suspected trend.)

Soil Water Potential

Soil water potential can be measured in the field in situ. Thermocouple psychrometers can be placed at given depths and manually read. If the psychrometers are installed at the same location as the neutron access tube, the soil water potential measurements and the soil water content measurements can be used to develop the retention curve in situ. However, Van Haveren (1974) has demonstrated that the retention curve, determined with the standard pressure-plate method for each soil layer, provides the same information. It is not recommended that a network of psychrometers be installed. Rather, the retention curve should be carefully determined in the laboratory for the soils at the depths water content is measured in the field.

4.5 Measurement of Meteorologic Variables

The recommendation has already been made to establish a "standard" weather station as soon as a watershed has been selected for study. Instrumentation beyond this basic set depends entirely on the research objectives. No attempt is made as to what meteorologic instrumentation is needed for specific research objectives. For more exhaustive descriptions, the reader can consult WMO (1965,1969), USDA (1979), and USGS (1980). Recommendations for individual instruments are found in the literature. Addresses of U.S. suppliers of hydrologic and meteorologic instruments and recorders are found in the Appendix.

4.6 Instrumentation to Measure Sediment Yield

Land use, of virtually any kind, results in soil losses at rates greater than the natural rate of soil loss. There are three principle sources of soil loss: (1) surface, (2) rills and gullies, and (3) channel bed and banks. Suspended transport dominates the removal process on unchanneled surfaces. In rills and gullies, bedload transport becomes more important, while in channels, both modes of transport account for the total sediment yield from a watershed. Sediment yield is the net soil loss after deposition and storage on the slopes or in the channels.

Plots

The measurement of soil loss from plots is usually accomplished by total collection of the runoff (for very small plots) or by runoff splitters that sample a given portion of the flow. The multi-slot samplers and the Coshocton wheel sampler are examples of the latter method. For all cases, storage tanks must be constructed to contain the volume of water sampled. These methods are impractical for watersheds larger than .5 ha.

Reservoirs

Reservoirs or stock-ponds are sometimes selected for sediment yield studies. The contour method is preferred, where an accurate topographic map of the reservoir is made with a plane-table or transit survey. Horizontal controls are carefully established and the reservoir is re-surveyed periodically (seasonally or annually). The difference between successive surveys represents the total volume of sediment.

If the reservoir periodically overflows, measurements of sediment inflow and outflow are needed to determine the trap-efficiency of the reservoir. Samples of the particle-size distribution of the sediment

inflow can be used in calculations, based on the reservoir size and the sedimentation rate, to estimate the trap-efficiency. Reservoir sediments must be sampled to determine the particle-size distribution and other physical characteristics of the sediments. Details are available in USDA (1979).

Suspended Sediment Sampling

Suspended sediments may be sampled manually or automatically. Manual methods usually employ the depth-integrating sampler, an example of which is the U.S. DH-48 sampler. The most important point to emphasize in using the integrating sampler is that the suspended sediment concentration varies vertically in the stream, horizontally across the stream, and with stream discharge. Therefore, the estimate of mean concentration must be based on adequate sampling. To determine the suspended sediment yield, the discharge and the suspended sediment concentration must be known. Total load (suspended plus "bedload") can also be measured with an integrating sampler if the measurements are taken at natural or man-made stream cross-sections that create turbulence and the predominant particle size is fine sand. Care must be taken not to sample in plunge-pools where material may be in suspension but not actually in transport.

Automatic Pumping Samplers

Automatic battery-operated suspended sediment samplers made their appearance about 15 years ago. These samplers pump a sample of streamflow into bottle containers at predetermined time intervals. The sampler is turned on and off by a float-controlled switch. Since the samples are collected at specific time intervals, discharge measurements are required at the same time, using either a weir or a flume.

Three automatic samplers, proven to be reliable in the field are recommended for field use: U.S. PS-69, Chickasha, and ISCO (Allan, 1981). Because there is such a variety of samplers and because the innovations and modifications are so many, a complete description of the different samplers is not given in this paper. Instead, an overview of the advantages and disadvantages will be presented.

The principal advantage of an automatic suspended-sediment sampler is that it will operate unattended. Only small samples are retained in the sample bottles, so there is no need for storage tanks used with the multi-slot dividers or the Coshocton wheel samplers. Since the samples of the sediment concentration can be referenced to the discharge at the time the sample was taken, sediment discharge can be determined. Sediment discharge can be calculated for each runoff event.

Disadvantages of the sampler include limitations of the particle size sampled, representativeness of the sample, the cost and complexity of the equipment, and the increased number of laboratory analyses. Only sand-size and smaller particles can be sampled, therefore total sediment load cannot be measured for streams with high sand-loads. Where the texture-class of the suspended sediment is predominantly silt and clay, the total sediment load measured is 98 percent or higher. For wide shallow streams, it is difficult to locate the intake nozzles where the sample will be representative of the average sediment concentration.

The mechanical and electrical complexity of the samplers can cause aggravating problems for the experienced as well as the inexperienced. Routine servicing and maintenance are required. The increased number of samples that have to be analyzed in the laboratory speaks for itself (USDA, 1979). Despite the possible problems, automatic samplers will continue to be used to provide estimates of sediment discharge. For watersheds smaller

than .5 ha, the multi-slot and Coshocton wheel samplers are recommended. For watersheds larger than .5 ha (up to 25,000 km²), the automatic pumping samplers will become "standard equipment" where measurements of sediment discharge are required.

Bedload Sampling

Bedload sampling with samplers of the U.S. DH-48 type results in biased estimates of bedload transport. This is because (1) the design of the intake nozzle of the integrating depth samplers does not adequately sample the larger particle sizes that move by saltation and creep along the bed of the stream and (2) the sampler nozzle cannot be placed close enough to the stream bottom. Hubbell (1964) concluded that no method, theoretical or empirical, is completely adequate to estimate bedload sediment discharge. The techniques for sampling or estimating bedload include basket samplers, tagged tracer particles (Hubbell and Sagre, 1965) and bedload formulas (Graf, 1971). Herbertson (1969) provided a critical review of bedload formulas.

Despite the inadequacy of virtually any of the present techniques, the basket-type samplers provide a more direct approach. These samplers have an open-box orifice, which is designed to minimize the distortion of the natural flow pattern. A basket or mesh receiver is attached to the downstream end of the sampler. To balance increased velocities at the intake orifice, a diverging section is designed at the outlet (Helley and Smith, 1971). Timed samples are taken with discharge measurements. The entire channel bed must be carefully sampled to obtain a representative estimate of bedload concentration.

Manually sampling suspended or bedload sediment by storm events is usually impractical because of the sampling frequency required. For

watersheds not smaller than 125 ha, the rising side of the hydrograph should be sampled every 5-15 minutes and the falling side of the hydrograph should be sampled every 30 minutes for the first 1.5 hours, every hour for the next 3 hours, and every 2 hours thereafter. For larger watersheds, the time between samples is about twice those above.

4.7 Sediment Rating Curves

To estimate total sediment transport, a sediment-rating curve is usually developed. The sediment-rating curve is developed by plotting sediment discharge versus stream discharge. Sediment concentration is sampled frequently for as many runoff events as possible. The intention is not to sample the hydrograph of all events, but to sample the range of discharges throughout the season or year on both the rising and falling sides of the hydrographs. Sediment discharge is plotted against stream discharge. The resulting curve provides an estimate of sediment transport rates from measurements of stream discharge. A very thorough description of this method appears in USDA (1979).

The principal drawback of the sediment-rating curve method is the assumption that streamflow discharge is the only factor affecting sediment yield. This is a serious shortcoming because the nature of the runoff event itself, i.e., runoff induced by high intensity rain, peakflow, flow duration, and sediment in storage (both on the slopes and in the channel) and time of the year are major factors determining sediment yield. Estimating sediment yield from stream discharge alone precludes relating sediment yield to land use or treatment effect. A final caution, the sediment-rating curve method is appropriate only for assessing long term (5-10 years) sediment yield, because of these problems.

5. Conclusion

This paper has presented guidelines for the selection and instrumentation of experimental watersheds. No attempt has been made to treat the subject of instrumentation exhaustively. Instead, guidelines for streamflow measurement, precipitation and soil water networks, and sediment measurement are suggested. Several sources of information are available that deal with watershed instrumentation. In particular, the reader should consult Gregory and Walling (1973), USDA (1979), and USGS (1977).

REFERENCES

- Allen, P.B., 1981. Measurement and prediction of erosion and sediment yield. ARM-S-15. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Amorocho, J. and A. Brandstetter, 1967. The representation of storm precipitation fields near ground level. *Journal of Geophysical Research* 72(4) 1145-1164.
- Anderson, Henry W., 1954. Suspended sediment discharge as related to streamflow, topography, soil and land use. *Trans. Amer. Geophys. Union*. 35:268-281.
- Anderson, Henry W., 1957. Relating sediment yields to watershed variables. *Trans. Amer. Geophys. Union* 38(6):921-924.
- Beckett, P.H.T. and Webster, R., 1971. Soil variability: A review. *Soils Fert.*, v. 34, no. 1, pp. 1-14.
- Bormann, F.H. and G.E. Likens, 1967. Nutrient cycling. *Science*. 155 (3761), 424-429.
- Bryan, B.A. and J.D. Hewlett, 1981. Effect of surface mining on stormflow and peakflow from six small basins in eastern Kentucky. *Water Resources Bulletin* 17(2), 290-299.
- Cassel, D.K. and Bauer, Armand, 1975. Spatial variability in soils below depth of tillage: Bulk density and fifteen atmosphere percentage. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 39, no. 2, pp. 247-250.
- Cochran, W.G., 1946. Relative accuracy of systematic and stratified random samples for certain class of populations. *Ann. Math. Statis.* 17:164-177.
- Dunne, T. and L.B. Leopold, 1978. *Water in environmental planning*. W.H. Freeman and Company, San Francisco. 818 p.
- Eagleson, P.S., 1970. *Dynamic Hydrology*. Mc-Graw-Hill, Inc. N.Y. 462 p.
- Foebes, C. and V. Ouryvaer (eds), 1970. Representative and experimental basins. An international guide for research and practice. *Studies and Reports in Hydrology*, No. 4, UNESCO, Paris, 348 p.
- Freeney, A.E. and J.D. Gabbe, 1969. A statistical description of intense rainfall. *Bell System Technical Journal* 48(6) 1789-1851.
- Graf, W.H., 1971. *Hydraulics of sediment transport*. New York. 544 p.
- Gregory, K.J. and D.E. Walling, 1973. *Drainage basin: form and process. A geomorphological approach*. John Wiley and Sons, New York. 456 p.
- Guy, H.P. and V.W. Norman, 1976. Field methods for measurement of fluvial sediment. Chap. 2, Book 3. *Techniques of water-resources investigations of the United States Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Arlington, VA.

- Hamilton, E.L. and L.F. Reimann, 1958. Simplified method of sampling rainfall on the San Dimas Experimental Forest. Tech. Paper No. 26. California Forest and Range Experiment Station, U.S. Forest Service, U.S.D.A. 8 p.
- Helley, E.J. and W. Smith, 1971. Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler. U.S. Geological Survey Open File Report, Menlo Park, CA.
- Herbertson, J.G., 1969. A critical review of conventional bedload formulae. *Journal of Hydrology* 8, 1-26.
- Hershfield, D.M., 1965. On the spacing of raingages. Symposium on Design of Hydrometeorological Networks. *Int. Assoc. Sci. Hydrol., Bull. No. 67*, pp. 72-79.
- Hewlett, J.D., H.W. Lull, and K.G. Reinhart, 1969. In defense of experimental watersheds. *Water Resources Research* 5(1), 306-316.
- Hewlett, J.D. and L. Pienar, 1973. Design and analysis of the catchment experiment. In: *Proceedings of a Symposium on Use of Small Watersheds in Determining Effects of Forest Land Use on Water Quality*. E.H. White (ed.). University of Kentucky, Lexington, Kentucky, May 22-23, 1973.
- Hubbell, D.W., 1964. Apparatus and techniques for measuring bedload. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1748.
- Hubbell, D.W. and W.W. Sagre, 1965. Application of radioactive tracers in the study of sediment movement. *Proc. Federal Inter-Agency Sedimentation Conference 1963*, U.S.D.A. Misc. Pub. 970 569-578.
- IASH, 1965. Symposium on representative and experimental areas. *International Assoc. of Scientific Hydrology, Pub. No. 66, V. 1*, 286-298.
- Ike, A.F. and Clutter, J.L., 1968. The variability of forest soils of the Georgia Blue Ridge Mountains. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 32, no. 1, pp. 284-288.
- Johnson, C.W., H.D. Copp, and E.R. Tinney, 1966. Drop-box weir for sediment laden flow measurements. *Journal of Hydraulics Div., Proc. Soc. Am. Civil Engr.* 95(HY5), 165-190.
- Mason, D.D., Lutz, J.F., and Peterson, R.G., 1957. Hydraulic conductivity as related to certain soil properties in a number of great soil groups—sampling errors involved. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 21, no. 5, pp. 554-560.
- McKay, G.A., 1965. Meteorological measurements for watershed research. In: *Proceedings of Hydrology Symposium No. 4*. National Research Council of Canada, Ottawa, Canada.
- Moss, M.E., 1982. Concepts and techniques in hydrological network designs. *Operational Hydrology Report No. 19*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Nielsen, D.R., Biggar, J.W., and Erh, K.T., 1973. Spatial variability of field measured soil water properties. *Hilgardia*, v. 42, no. 7, pp. 215-259.
- Pereira, H.C., 1973. *Land use and water resources*. Cambridge University Press. 246 p.
- Petersen, R.G. and Calvin, L.D., 1965. Sampling, in Black, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Agronomy monograph no. 9, pt. 1, Madison, Wisc., Am. Soc. Agronomy, pp. 54-71.
- Post, H.E., 1982. The effects of clearcutting and regeneration on dissolved mineral export and water yield in the Georgia piedmont. M.S. Thesis, University of Georgia, Athens, GA. 55 p.
- Riekert, H., 1983. Impacts of silviculture on flatwoods runoff, water quality, and nutrient budgets. *Water Resources Bulletin*, 19(1), 73-89.
- Rogowski, A.S., 1972. Watershed physics: Soil variability criteria. *Water Resources Research*, v. 8, no. 4, pp. 1015-1023.
- Rothacher, Jack, 1965. Experimental watersheds used as a research tool by the Forest Service. Paper presented at Unit Source Watershed Conf., ARS, St. Louis, MO.
- Shaw, M.D. and Arble, W.C., 1959. Bibliography on methods for determining soil moisture. *Engin. Res. Bull. B-78*, 152 p. The Pennsylvania State University, University Park, Pa.
- Stol, Ph. Th., 1972. The relative efficiency of the density of raingage networks. *Jour. of Hydrol.*, 15, pp. 193-208.
- Tyler, G.W., 1953. Numerical integration of functions of several variables. *Canad. Jour. Math.* 5:393-412.
- USDA, 1979. Field manual for research in agricultural hydrology. *Agricultural Handbook No. 224*, Agricultural Research Service, U.S. Dept. Agr. Washington, D.C. 547 p.
- USGS, 1977. National handbook of recommended methods for water-data acquisition. Office of Water Data Coordination. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- USGS, 1980. Hydrometeorological observations. Chapter 10. In: *National handbook of recommended methods for water-data acquisition*. Office of Data Coordination, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Van Haveren, B.P., 1974. Soil water phenomena of a shortgrass prairie. M.S. Thesis. Department of Earth Resources, Colorado State Univ., Ft. Collins, Colorado. 172 p.
- Wilm, H.G., 1949. How long should experimental watersheds be calibrated? *Trans. Am. Geophys. Union*, 30, 272-278.

WMO, 1965. Guide to hydrometeorological practices. WMO, no. 168, TP82. Secretariat of the World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.

WMO, 1969. Guide to meteorological instrument and observing practices. WMO, no. 8, TP3. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva Switzerland.

APPENDIX

GENERAL INSTRUMENT SOURCES

- Science Associates, Inc.
230 Nassau Street
Box 230
Princeton, N.J. 08540
(609) 924-4470

(full line of hydrologic and meteorologic instruments)
- Weather Measure Corporation
P.O. Box 41257
Sacramento, CA 95841
(916) 481-7565

(full line of hydrologic and meteorologic instruments)
- Weathertronics
2777 Del Monte Street
P.O. Box 1437
West Sacramento, CA 95691
(916) 371-2660

(full line of meteorologic instruments)
- Sierra-Misco, Inc.
1825 Eastshore Highway
Berkeley, CA 94710
(415) 843-1282

(full line of meteorologic instruments)
- Belfort Instruments
1600 S. Clinton Street
Baltimore, MD 21224

(Standard USWB meteorologic, hydrologic instruments)
- Fischer and Porter, Co.
94 County Lane Road
Warminster, PA 18974
(215) 674-6324

(digital punch tape water level recorders, raingages)
- Teledyne-Gurley
514 Fulton Street
Troy, N.Y. 12181
(518) 272-6300

(current meters, hook gages, rods)

GENERAL INSTRUMENT SOURCES:

- Leopold and Stevens, Inc.
Box 688
Beaverton, OR 97075

(503) 646-9171

(water level recorders, staff gages)

- Marsh-McBirney, Inc.
8595 Grovemont Circle
Gaithersburg, MD 20760

(magnetic current meters)

SOIL MOISTURE EQUIPMENT

- Troxler Electronic Laboratories, Inc.
P.O. Box 12057
Cornwallis Road
Research Triangle Park, N.C. 27709

(919) 549-8661

(neutron moisture meters)

- Campbell-Pacific Nuclear
130 S. Buchanan Circle
Pacheco, CA 94553

(415) 687-6472

(neutron moisture meters)

- Soil Moisture Equipment Corporation
3005 Dela Vina Street
Santa Barbara, CA

(805) 964-3525

(soil moisture sampling and extraction)

- Soil Test, Inc.
2205 Lee Street
Evanston, ILL 80202

(312) 869-5500

(broad soils, soil mechanics, sampling, general soils)

PRE-FAB FLUMES

- Thompson Pipe and Steel
Denver, CO

(Parshall flumes--steel)

- Plasti-Fab, Inc.
P.O. Box 100
Malatin, OR 97002

(503) 638-8555

(H. flumes, Parshall flumes - fiberglass)

- Free Flow, Inc.
Box 4067
Benson Station
Omaha, NE 68104

(402) 397-8910

(Parshall flumes -- fiberglass)

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

CALIBRATION AND DETECTION OF CHANGES I
IN EXPERIMENTAL WATERSHEDS

Prof. José D. Salas

Montevideo-Uruguay

RESEARCH ORIENTED WORKSHOP ON EXPERIMENTAL WATERSHEDS
U.S.-Uruguay Bilateral Cooperation
Montevideo, Uruguay

CALIBRATION AND DETECTION OF CHANGES IN EXPERIMENTAL WATERSHEDS

by
Jose D. Salas
Associate Professor of Civil Engineering
Colorado State University, Fort Collins, Colorado 80523, USA

Abstract

Experimental watersheds are useful tools for determining the natural response in terms of water quantity and quality occurring throughout the watershed as well as for determining the changes that may occur as a result of man-made changes or "treatments" in the watersheds. For such purposes, measurements of the variables of interest are usually made during a time period before and a time period after the "treatment" occurs in the watershed. Calibration of the experimental watershed is referred to the process of field experiments, and data analysis and synthesis by which the model relating the variable(s) of interest and other measurable variables in the watershed is defined under natural or existing conditions. Once the "treatment" occurs, the question is how it will affect the response of the watershed. In order to identify or quantify such effect, measurement must be continued after the "treatment" so that comparisons can be made between the responses before and after the "treatments".

This paper will concentrate on reviewing the state of the art of the techniques available for calibrating and detecting the above referred changes in the watershed. A discussion will be made on the use and application of recent statistical approaches for calibrating and detecting changes in the watersheds.

1. INTRODUCTION

The study of the hydrologic cycle of watersheds has attracted the attention of scientists and engineers around the world since ancient times. The reason is that man's basic needs for food and shelter, and for that matter, basic needs for any living thing on earth are, in one way or another, related to the day-to-day, month-to-month and year-to-year fluctuations of the various variables comprising the hydrologic cycle. More specifically, man's activities such as agricultural development, hydropower, flood control, drought control, navigation, water supply in general, road construction, mining, recreation and water and environmental quality control are directly related to the variations of streamflow, precipitation, infiltration, evapotranspiration, groundwater, soil moisture, sediment transport and snow accumulation and melt.

In general, the study of the hydrologic cycle of watersheds is not a simple task. It involves a number of processes, variables and parameters which often are not well understood and are difficult to measure and identify. In order to "simplify" the problem, the hydrologic cycle may be studied under controlled conditions in a watershed of a manageable size, with perhaps more uniform geomorphologic and climatic characteristics so that "we may eventually understand all the major processes at work on watersheds, and, perhaps, even be able to measure most of them" (Hewlett et al., 1969). Such watershed under controlled conditions is known as the experimental watershed.

Experimental watersheds are not only useful for "learning" about the various processes of the hydrologic cycle per se but for studying the impacts of natural induced and man-made (cultural and land-use) changes on the various hydrologic processes taking place in watersheds.

Natural induced changes may result from rare natural events such as forest fires, volcanic explosions and land slides. On the other hand, man-made changes occur due to various cultural and land-use changes such as forest cutting or in general destruction of vegetative cover, altering of vegetative cover (say hardwood to white pine as in Swank and Miner, 1968), grazing by livestock, altering the soil (erosion and compaction), modifying agricultural practices, road construction and surface mining. In studying the impacts of such changes occurred under controlled watersheds, it is expected that results could be transferred to other watersheds under similar land-use or management practices. Ultimately, the knowledge of such impacts would aid in a better planning and management of watersheds and river basins.

The main objective of this paper is to discuss the state of the art of the techniques available for detecting changes that may occur in hydrologic processes of experimental watersheds as a result of changes in land-use and management practices in the watersheds, as discussed above. Usually the detection of such changes assumes a period of calibration which is carried out for a number of years prior to the time when the change occurs. This is especially important when planning an experiment. However, changes may be studied independent of the calibration period. For this reason, the two topics of calibration and change detection are presented in separate sections of this paper, although cross-references will be made whenever necessary.

2. BASIC CONCEPTS

To put the problem of detection of changes and calibration under perspective, let us assume that we are interested in determining the water yield y of a watershed. Conceptually, we may consider that the

yield is a function of a set of climatic variables \underline{x} , a set of geomorphological variables \underline{g} and a set of land-use and management practices \underline{u} . In mathematical form we have

$$y = f(\underline{x}, \underline{g}, \underline{u}) \quad (1)$$

For example, precipitation and evapotranspiration may be part of \underline{x} , the area and slope may be part of \underline{g} and the fraction of the watershed covered with a given type of vegetation may be part of \underline{u} . To simplify the problem, considering a particular watershed for which \underline{g} remains unchanged through time, Eq. (1) may be rewritten as

$$y = f(\underline{x}, \underline{u}) \quad (2)$$

Thus, our problem is to find that function f which would transform \underline{x} and \underline{u} into y . For instance, if we could find that the function f is a linear regression as

$$y = a + b_1 P + b_2 u + e \quad (3)$$

where P is precipitation, u is a given land-use variable, e is the error and a , b_1 and b_2 are the regression coefficients, then we could very simply determine the response $y + \Delta y$ due to say a new land-use variable $u + \Delta u$. In other words, if we know the change in land-use Δu , Eq. (3) would tell us how much is the change Δy . In this case, Eq. (3) becomes our calibration equation. For a particular watershed, the above may be feasible only with "artificial" small experimental watersheds (runoff plots) in which different land-use treatments \underline{u} may be tried and the corresponding responses y measured.

For a natural watershed the above procedure may not be feasible. So, a further simplification of Eq. (3) may be as

$$y = a + b P + \epsilon \quad (4)$$

in which the regression coefficients may indicate the land-use effects. In this case a calibration period would be required before the land-use change occurs so that the parameters a and b are determined. Then, Eq. (4) is used for predicting y after the treatment and compared with the actual measured values. The differences between them are tested statistically to determine whether a change has occurred.

In general, we could say that calibration of an experimental watershed may be referred to determining the standard or normal response of a watershed to the standard or normal climatic variables under the given geomorphological and land-use characteristics of the watershed. For instance, the objective of our calibration may be to determine the relationship between water yield and precipitation for the current geomorphological and land-use characteristics of the watershed under consideration. This is normally followed by analysis directed to detect whether a given land-use change or "treatment" produces a change in the expected water yield under "normal" conditions which would also imply a new relationship between water yield and precipitation.

Most studies of calibration and detection of changes in experimental watersheds have been related to some kind of streamflow characteristics such as: volumes of water per month, season or year; properties of flood hydrographs such as peak discharges, time to peak, time base, volume of direct runoff, and number of floods per year above a given threshold level; properties of low flows such as low flow discharges or volumes for given time interval or duration (say the 10-day low flow volume), the number of days per year (or per season) in which flows are below or equal to a given threshold value, and the maximum run length (drought duration) of run sum (drought magnitude) per year for a

given demand level. Likewise, studies have been made related to water quality such as turbidity, temperature, chemical content and sediment transport (Reinhart, 1966).

One of the reasons for calibrating an experimental watershed is to have a reference measure of the variable of interest, say streamflow, under given land-use conditions so that when a certain treatment occurs a judgement can be made of the streamflow values obtained after the treatment in relation to those before the treatment. For instance, Fig. 1 shows a schematic representation of a watershed subject to a land-use treatment at time t . So we may ask the question, what would have been the value of y_{t+1} if treatment did not occur and what would be the new value of y_{t+1} after treatment? Is the change Δy significant? Or given that the historical record of streamflow is known before the treatment, can we make an inference whether the new value y_{t+1} have a significant change? This brings up two important points. The first is concerning the length of the historical record before the treatment (calibration period) and the second is about the length of time after the treatment so that one can say with a given confidence whether a change in the flows has been significant or not.

Sufficient length of record of the calibration period is necessary in order to have certain precision of the normal or standard value of y (see Fig. 2). For instance, if such standard value of y is measured in terms of the mean \bar{y} , then we would like to estimate \bar{y} with a certain degree of precision. How good the sample mean \bar{y} estimates the population mean μ may be measured by $\text{Var}(\bar{y})$, the variance of \bar{y} . Let us assume that during the calibration period we have the sequence y_1, y_2, \dots, y_N , and such sequence is drawn at random from a normal

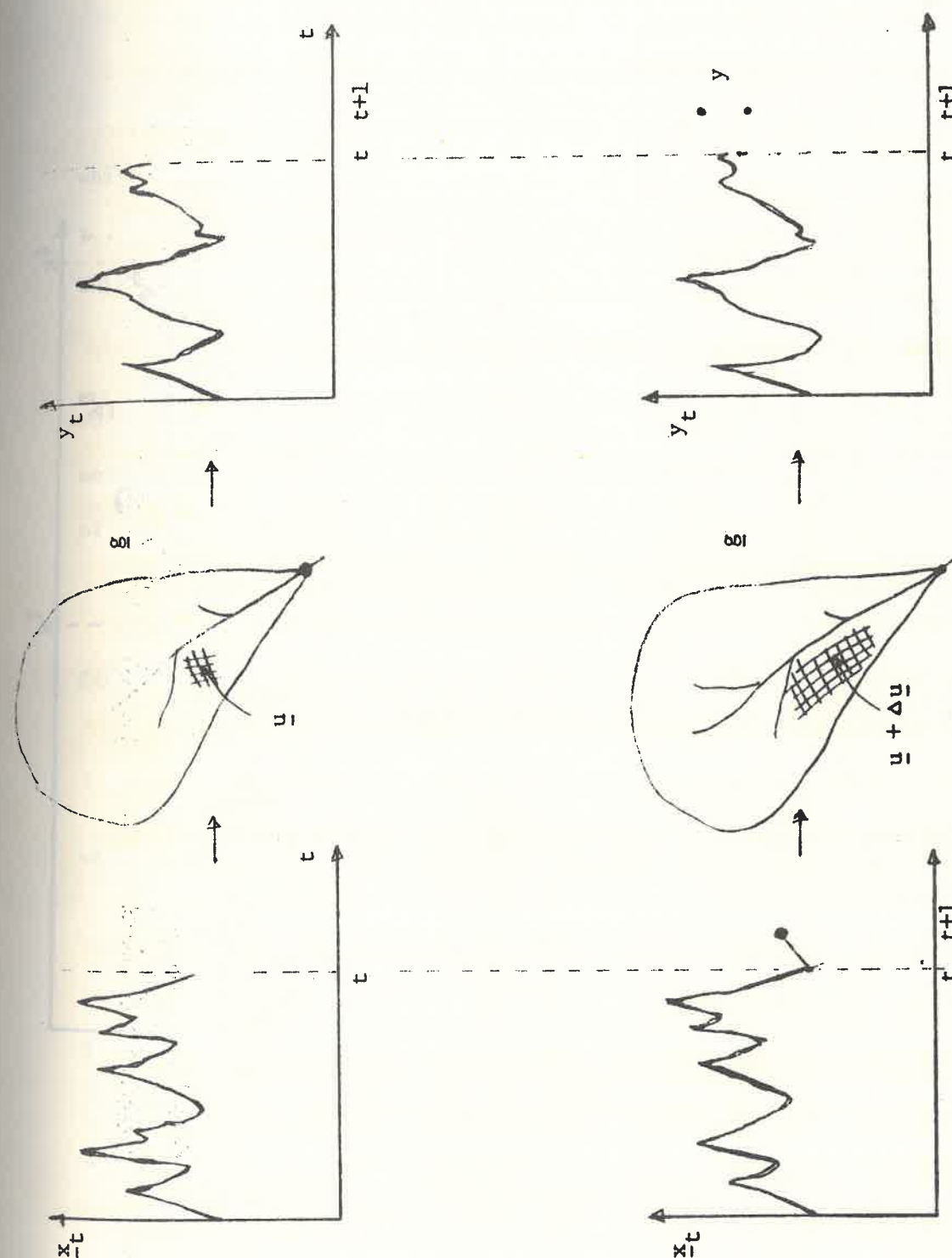


Figure 1.

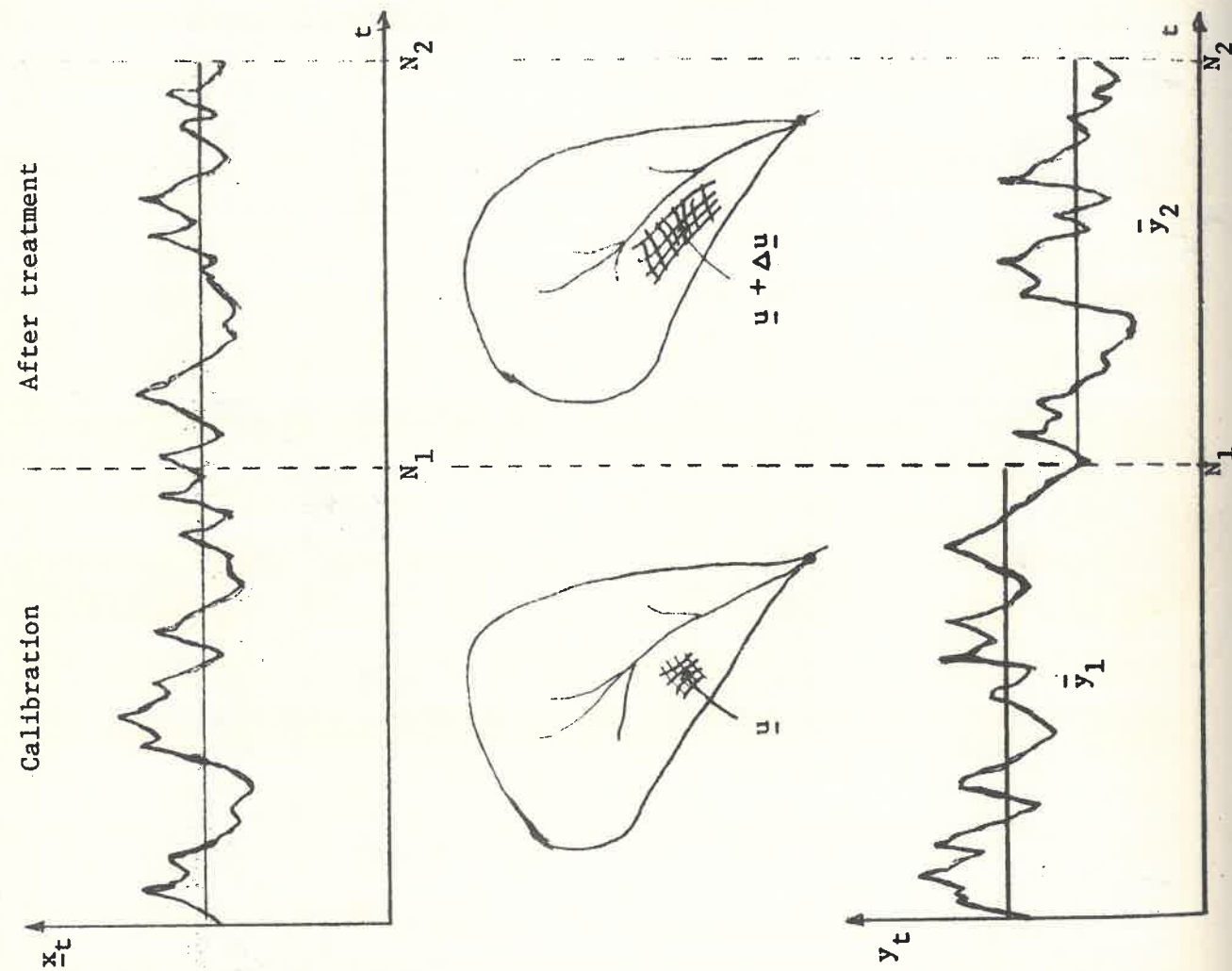


Figure 2.

population with mean μ and variance σ^2 . Then, it may be shown (Mood et al., 1972) that the variance of \bar{y} may be given by

$$\text{Var}(\bar{y}) = \frac{\sigma^2}{N} \quad (5)$$

However, often the observations y_1, \dots, y_N are correlated, in which case Eq. (5) is not applicable anymore. Suppose that the sequence y_1, \dots, y_N is correlated (autocorrelated) in the form of a first-order autoregressive model, namely

$$y_t = \rho y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (6)$$

where ρ is the lag-one serial correlation coefficient and ε_t is a normal random variable independent of y_{t-1} . In such case, the variance of \bar{y} becomes

$$\text{Var}(\bar{y}) = \frac{\sigma^2}{N} \left\{ 1 + \frac{2\rho}{(1-\rho)} \left[1 - \frac{(1-\rho^N)}{N(1-\rho)} \right] \right\} \quad (7)$$

Equation (7) may be put in a form similar to Eq. (5) as

$$\text{Var}(\bar{y}_1) = \frac{\sigma^2}{N_e} \quad (8)$$

where N_e is called the effective sample size which is equal to

$$N_e = N \left\{ 1 + \frac{2\rho}{(1-\rho)} \left[1 - \frac{(1-\rho^N)}{N(1-\rho)} \right] \right\}^{-1} \quad (9)$$

In the above we have assumed that σ^2 is known. In most situations this is only estimated from the given sample in which case σ^2 of Eqs. (5), (7), and (8) is substituted by the sample variance s^2 .

Thus, if our problem is to estimate μ with a given precision we may use the statistic t as

$$t = \frac{\bar{y} - \mu}{s/\sqrt{N}} \quad (10)$$

where t follows the student's t -distribution with $N - 1$ degrees of freedom. Then, the $1 - \alpha$ confidence interval about the mean may be written as

$$P\left[|\bar{y} - \mu| \leq \frac{s t}{\sqrt{N}}\right] = 1 - \alpha \quad (11)$$

where now t is the t -variate corresponding to the probability $1 - \alpha/2$ (or confidence level α) and $N - 1$ degrees of freedom. Defining the confidence width $2|\bar{y} - \mu|$ as some fraction f of the sample mean \bar{y} we can write

$$f \bar{y} = 2|\bar{y} - \mu| \quad (12)$$

the, from Eq. (11) we have

$$N = \left(\frac{2 s t}{f \bar{y}}\right)^2 \quad (13)$$

or

$$N = \left(\frac{2 c t}{f}\right)^2 \quad (14)$$

where c is the coefficient of variation. So for specified values of c , f and α we can find by trial and error the required sample size N . In the case of correlated samples N_e would replace N in Eqs. (10) through (14) and N may be found for Eq. (9) given that ρ is either assumed or estimated from previous records.

Actually, the problem of determining the length of the calibration period is more complex than the above because usually such length is related to the length of the period after the treatment so that a change is detected with a given precision. Methods proposed for approaching this problem are discussed in the next section.

3. METHODS OF CALIBRATION

In general the methods for calibrating experimental watersheds may be classified as: (1) Single Watershed Method, (2) Paired Watershed Method, and (3) Multi-Watershed Method. The basis of these methods are explained herein.

Single Watershed Method

In this approach the watershed is calibrated on itself (Reigner, 1964). The variable of interest, say streamflow, is statistically or deterministically (physical-conceptual) related to those climatic variables that influence it for the given geomorphological characteristics of the watershed and land use characteristics prevailing during the period of calibration. Figure 3 describes schematically how this method works.

Consider that we have a particular watershed with given geomorphological characteristics, and land-use characteristics represented by the vector \underline{u} . Assume that during the calibration period N the climatic variables are represented by the vector \underline{x}_t , and the response of the watershed, say streamflow, is represented by y_t (see Fig. 3). Then, following similar reasoning as outlined in section 2, the calibration of the watershed is given by the model which transforms the set \underline{x}_t into y_t or

$$y_t = f(\underline{x}_t) \quad (15)$$

There are several ways how this function f may be determined.

A common procedure is the so-called double-mass curve analysis. This is a well known tool used for detecting and adjusting inconsistencies in hydrologic data. In this approach the accumulated value of the

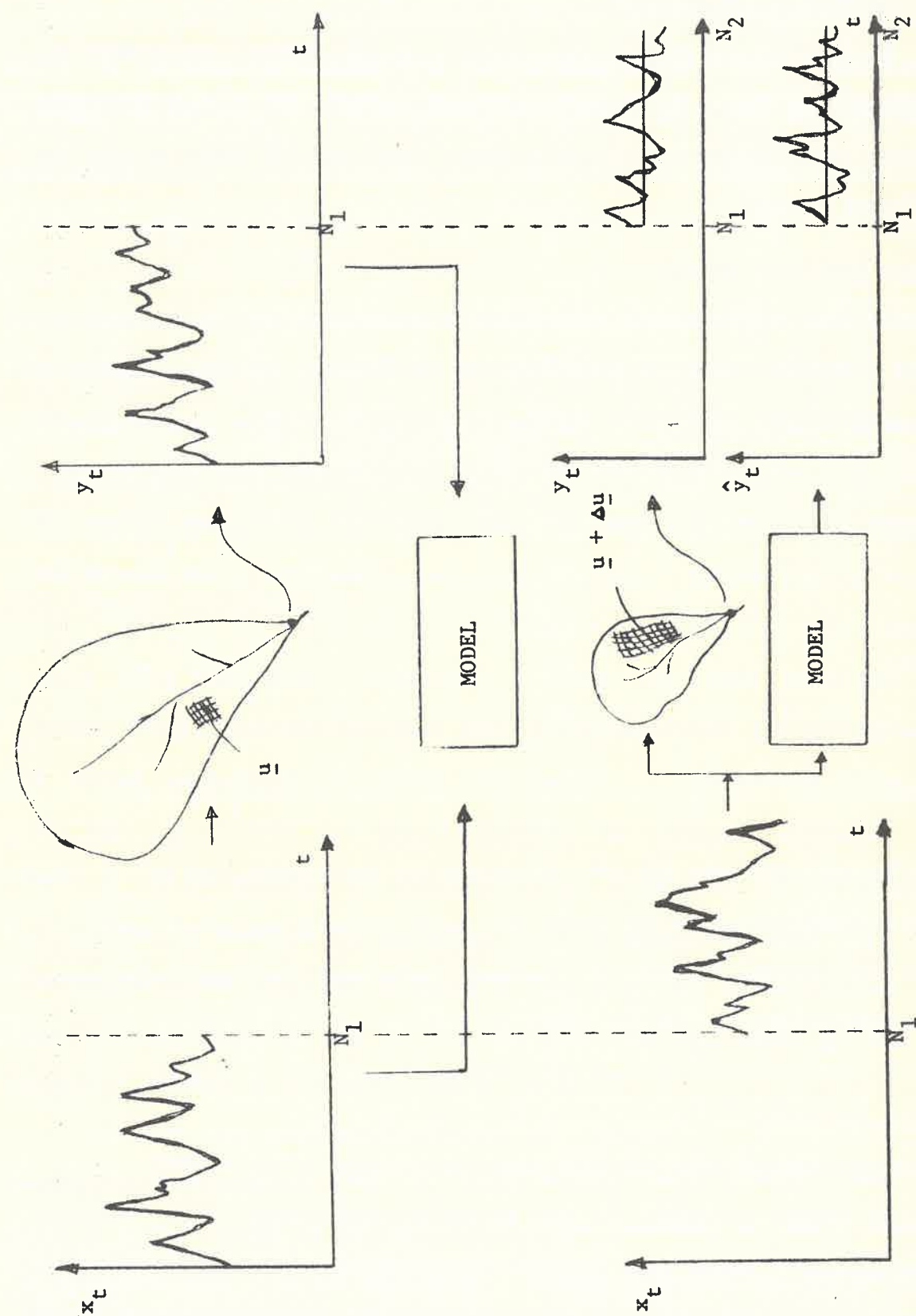


Figure 3. Conceptual representation of a calibration procedure for a single watershed

dependent variable y_t (say streamflow) is plotted against the accumulated value of the climatic variable x_t (say precipitation). The plot is called the mass-curve and the slope or trend of the curve is an indication of the land-use characteristic u .

Let y_1, \dots, y_N be N successive observations of the dependent variable y_t . Let x_1, \dots, x_N be the corresponding observations of the climatic variable considered to influence y . The successive partial sums of the y_i 's and x_i 's are formed; that is, set

$$S_1(y) = y_1, S_2(y) = y_1 + y_2, \dots, S_k(y) = y_1 + \dots + y_k, \dots, \text{ and}$$

$$S_N(y) = y_1 + \dots + y_N$$

Likewise,

$$S_1(x) = x_1, S_2(x) = x_1 + x_2, \dots, S_k(x) = x_1 + \dots + x_k, \dots, \text{ and}$$

$$S_N(x) = x_1 + \dots + x_N.$$

The points $[S_1(x), S_1(y)], \dots, [S_N(x), S_N(y)]$ are plotted and the curve through the points is called a double-mass curve. Due to the fact that the $S_i(x)$'s and $S_i(y)$'s are partial sums of non-negative quantities, the double-mass curve is a curve growing in a northeasterly direction. The data are related and this relationship is of such a nature that the curve usually forms a straight line. A break in the slope of the curve is taken as evidence of a change in the data. An application of this approach for calibrating and detecting changes in peak flows and sedimentation due to occurrences of wildfires in watersheds may be found in Anderson (1955).

Various statistical models, including covariance and regression analysis have been explored in attempts to test and significance of

breaks in the mass-curve. Wigbout (1973) points out some dangers in becoming too confident in statistical analyses. On the other hand, Chang and Lee (1974) propose an objective computerized method of double-mass analysis. The double-mass curve provides a reasonable graphical display to use as a base for detecting change. Wigbout suggests that analyzing the differences $y_t - x_t$ or $y_t - b z_t$ (where b is some slope) might provide an alternate approach to be used graphically or analytically. Actually by introducing such differences, a single series results and it may be analyzed using single series procedures. In particular, an intervention analysis could be performed when the time and type of intervention is known.

Another approach for calibrating single watersheds is by regression analysis in which the dependent variable y_t , say streamflow, is regressed as a function of a set of climatic variables x_t such as precipitation and temperature. These equations are then used after the treatment and the predicted runoff \hat{y}_t is compared with the measured y_t . The differences are tested statistically for detecting the effect of the treatment (see Fig. 3). Applications of this approach of calibration may be found in Reigner (1964) and Leibschev (1972).

Instead of using a regression equation for determining the dependent variable y_t it may be possible to set up a deterministic (physical-conceptual) model to describe the various processes taking place in the watershed. For instance, a simplified model for a watershed may be built by considering that the watershed is made up of say three storages, namely, surface storage S_t , soil storage W_t , and groundwater storage G_t as shown in Fig. 4. Mass balance equations for each storage combined with equations describing the dynamics of the

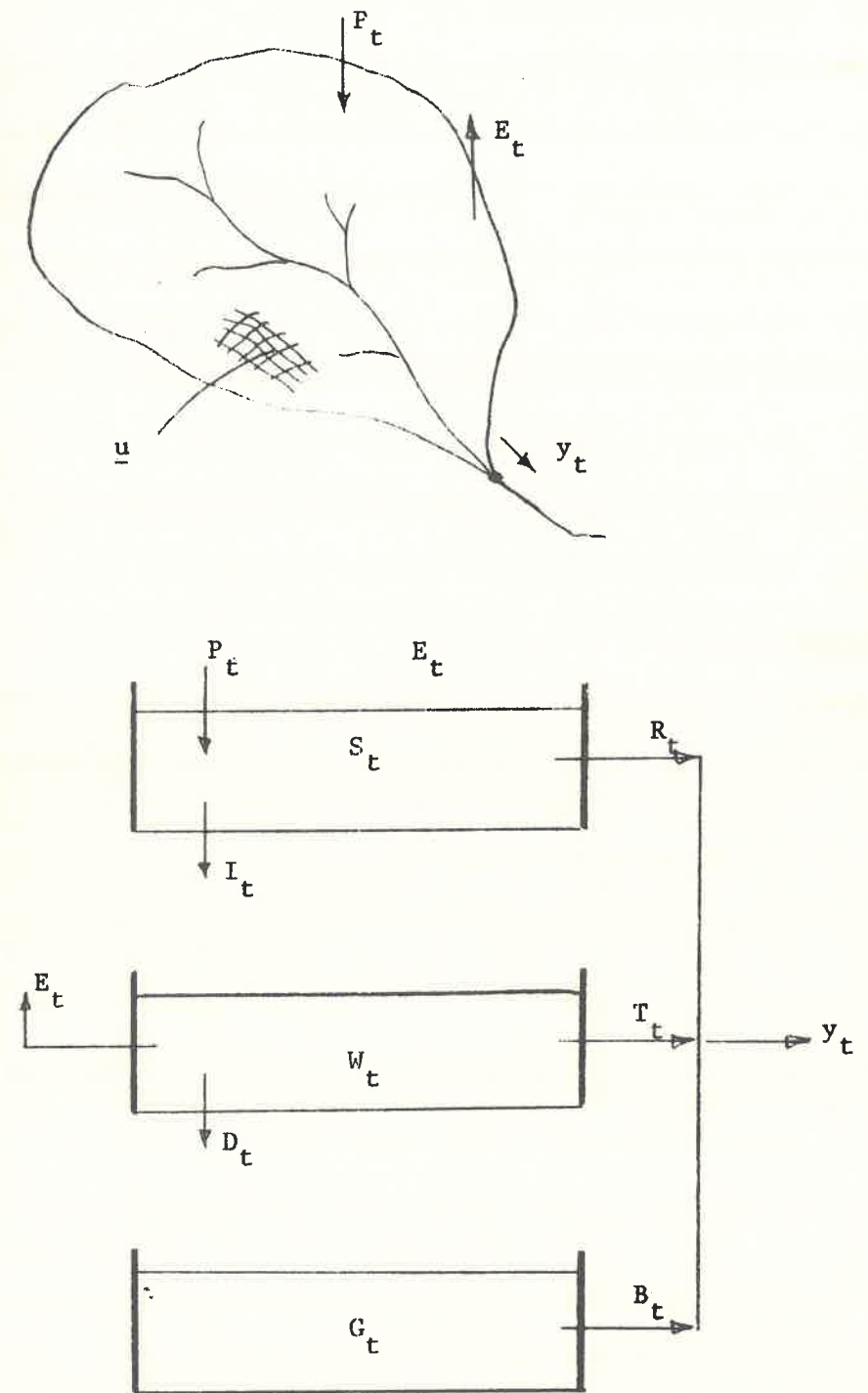


Figure 4. Conceptual representation of the hydrologic cycle of a watershed which could be used for calibrating a single watershed.

various inputs and outputs considered will relate y_t with some measurable and derived variables. Data during the calibration period will enable to calibrate the model. Then, as in previous cases, the model will be used after the treatment for determining the flows \hat{y}_t which will be compared with the measured flows for the analysis of the effect of the treatment. An example of this approach using the USDAHL model (Holtan and Lopez, 1971, and Holtan et al., 1975) may be found in Langford and McGuinness (1976). They used the model for detecting the changes in annual runoff for an experimental watershed where land-use changed due to reforestation and subsequent thinning.

Paired Watershed Method

This method requires the selection of a control watershed with similar characteristics (size, shape, aspect, slope, location, soil, climate and land use) as the watershed under consideration. The dependent variable, say streamflow, is measured in both watersheds until the relationship between them is determined. Subsequently, the watershed under consideration is subject to a given treatment or land-use change Δu and the control watershed remains untreated or unchanged. Then, the relation found during the calibration period is used for predicting the flows in the treated watershed based on the concurrent flows measured in the control watershed. Further analysis of the predicted and measured flows in the treated watershed is then made to determine whether a change has occurred. A schematic representation of this approach is shown in Fig. 5.

The foregoing relationship (calibration) between the flows at the paired watersheds may be determined by essentially two procedures. One is the use of the double-mass curve, as indicated before, and the other

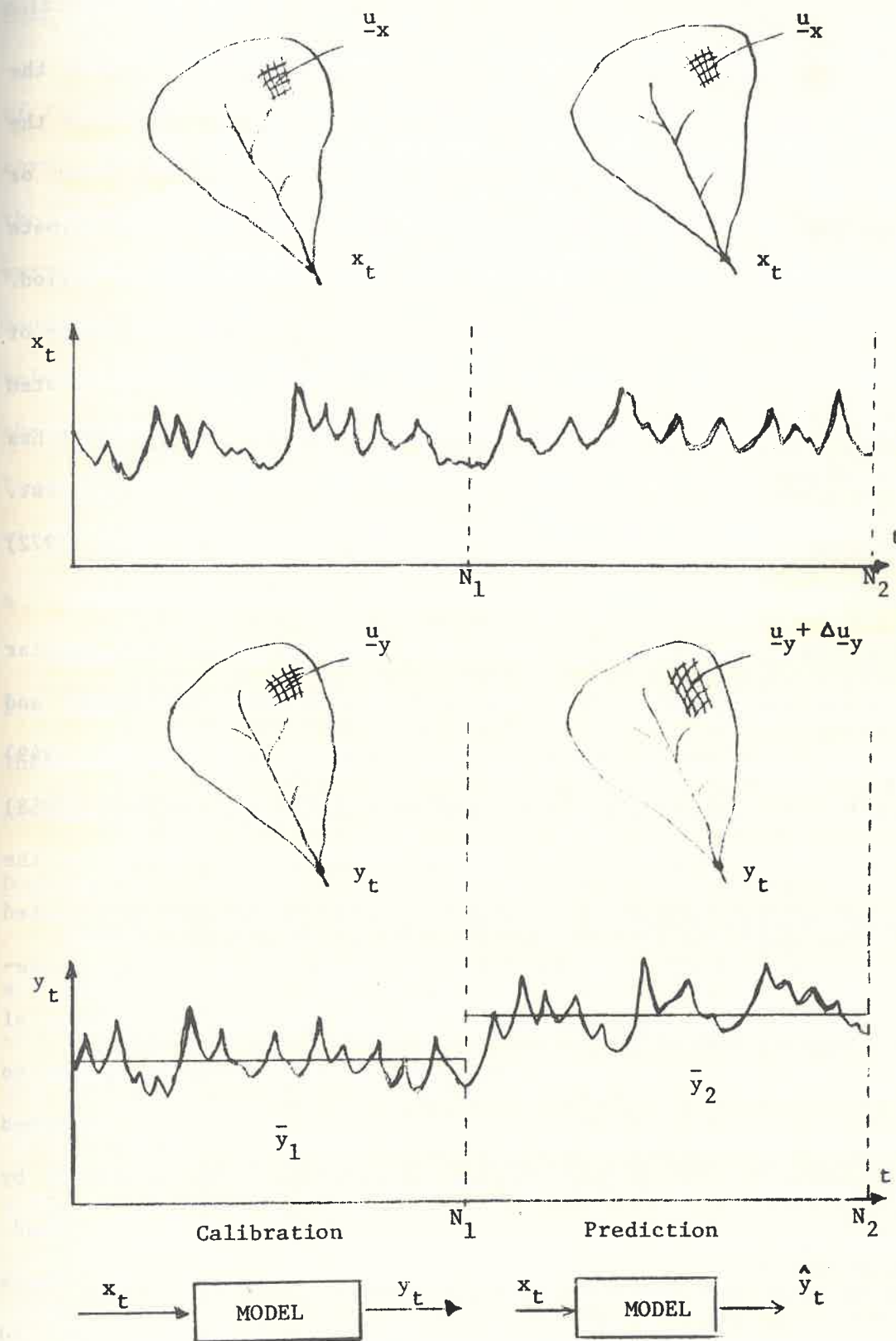


Figure 5. Calibration of a watershed based on the paired watershed method.

is based on covariance analysis. In the double-mass analysis the accumulated flows in the watershed to be treated are plotted versus the accumulated flows in the control watershed. The resulting trend or slope of the mass curve reflects indirectly the effects of the climate and land-use characteristics prevailing during the calibration period. Then, the analysis proceeds by determining whether the trend or slope of the mass curve changes as a result of the land-use change in the treated watershed. If it does, the conclusion is reached that the treatment has produced a change in the flow regime in the watershed of interest. Applications of this approach may be found in studies by Yates (1972) and Scarf (1972).

The use of covariance analysis have been one of the most popular and widely used methods for experimental watershed calibration and change detection. It has been originally proposed by Wilm (1944, 1949) and subsequently modified by Kovner and Evans (1954) and Reinhart (1958) especially in relation to the time required for the calibration and the period of analysis after the treatment so that changes can be detected with a given precision and confidence. In general, the overall procedure is based on determining a regression equation between the flows of the watershed to be treated and the flows of the control watershed so that it can be used for predicting the flows at the treated watershed after treatment. The effect of the treatment will be identified by comparing the measured and predicted flows in the treated watershed. Applications of this approach have been reported by Nakano (1966), Swank and Miner (1968), and Hibbert (1969). See also Reinhart (1966) and Hewlett et al. (1969).

Multiwatershed Method

In this approach a number of watersheds representing a wide range of conditions with respect to factors to be evaluated, say vegetative cover, are selected and a multiple regression analysis is made between the dependent variable, say streamflow, versus a set of "independent" variables such as watershed area, soil type, rainfall, temperature and land-use characteristics. An advantage of this approach is that the selected watersheds may be of different geomorphological and land-use characteristics. Figure 6 shows schematically this method. Applications of this approach have been reported by Anderson (1957), Storey et al. (1964), Striffler (1965), and Lull and Sopper (1966).

4. METHODS OF DETECTION OF CHANGES

Several of the approaches described under methods of calibration are applicable for detecting changes in hydrologic regimes in general. Therefore, this section concentrates only on those approaches which were not covered previously.

Description of Problem

Assume that data is recorded in discrete time and that observations are available for N successive time epochs. Let y_1, \dots, y_N denote the observed data. For instance y_j is the observed streamflow of the j th time epoch, $j = 1, \dots, N$. Assume that y_1, \dots, y_N are observations of the random variables Y_1, \dots, Y_N , respectively. The problem is modeled by assuming something about the joint distribution of Y_1, \dots, Y_N . This is the usual background setup in stochastic modeling. Write Y_1, \dots, Y_N as $Y_1, \dots, Y_{\tau-1}, Y_{\tau}, Y_{\tau+1}, \dots, Y_N$ where it is assumed that a "change," which may or may not affect the distribution of the Y_i 's, occurs between time epochs τ and $\tau + 1$, $\tau = 1, \dots, N-1$.

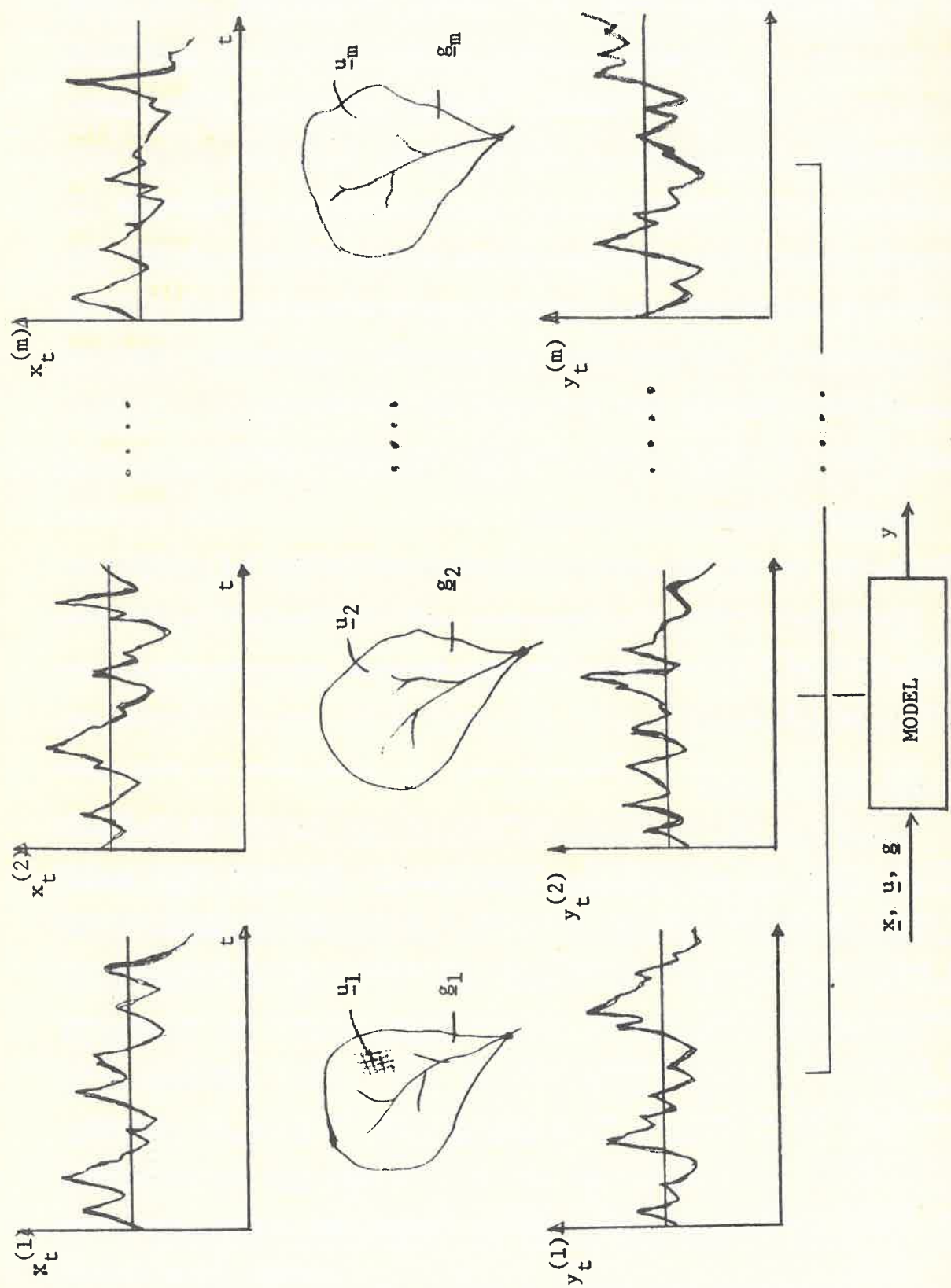


Figure 6. Calibration of a watershed by the multiwatershed method.

One problem of detection-of-change is the following: assume Y_1, \dots, Y_τ have marginal cumulative distribution function (cdf) $F(\cdot)$ and $Y_{\tau+1}, \dots, Y_N$ have marginal cdf $G(\cdot)$; test the null hypothesis that F is identical to G , that is, there is no change in marginal distribution before and after time epoch τ . If τ is assumed known and the Y_i 's are assumed independent this reduces to the classical two-sample problem for which there are many standard statistical analyses. In fact, there are several nonparametric techniques that work quite well, such as the Kolmogorov-Smirnov two sample test. For reference see any of many texts on nonparametric statistics.

The above describes just one problem of detection-of-change associated with a single series. There are others, outlined as specific problems, given below. Some allow for more than one change epoch.

Case of Independence--Time of Change Known

If additional model assumptions are imposed, we are led to some classical statistical tests. For instance, suppose Y_1, \dots, Y_τ are independent and identically distributed (iid) normal random variables with mean μ_1 , and variance σ^2 and $Y_{\tau+1}, \dots, Y_N$ are iid normal with mean μ_2 and variance σ^2 . Further assume Y_1, \dots, Y_τ independent of $Y_{\tau+1}, \dots, Y_N$. Then the standard two sample t-test can be used to test the equality of μ_1 and μ_2 . Let

$$T = \left(\frac{(\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{(1/\tau) + (1/(N-\tau))}} \right) / \sqrt{\frac{\tau \sum_{j=1}^{\tau} (Y_j - \bar{Y}_1)^2 + \sum_{j=\tau+1}^N (Y_j - \bar{Y}_2)^2}{N - 2}}, \quad (16)$$

where $\bar{Y}_1 = (1/\tau) \sum_{j=1}^{\tau} Y_j$ and $\bar{Y}_2 = (1/(N-\tau)) \sum_{j=\tau+1}^N Y_j$, then T has a t-distribution with $N-2$ degrees of freedom with $\mu_1 = \mu_2$ serves as a test

statistic for testing $H_0: \mu_1 = \mu_2$ versus $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ or $H_1: \mu_1 < \mu_2$. The usual results on the two sample t-test apply. For example, the power of the test can be obtained and the magnitude of τ and N necessary to achieve a prescribed power for some fixed $\mu_2 - \mu_1$ can be found. Also, T of Eq. (16) serves as a pivotal quantity and can be used to give a confidence interval estimator of $\mu_2 - \mu_1$, which is the change in the mean level. This is all standard statistical theory and will not be stressed.

A similar setup leads to the F-test as a vehicle for detecting change in the variance. Suppose now that Y_1, \dots, Y_τ are iid $N(\mu_1, \sigma_1^2)$ and $Y_{\tau+1}, \dots, Y_N$ are iid $N(\mu_2, \sigma_2^2)$ and Y_1, \dots, Y_τ are independent of $Y_{\tau+1}, \dots, Y_N$. To test $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$, the test statistic

$$\left[\frac{\sum_{j=1}^{\tau} (Y_j - \bar{Y}_1)^2 / (\tau - 1)}{\sum_{j=\tau+1}^N (Y_j - \bar{Y}_2)^2 / (N - \tau - 1)} \right] \quad (17)$$

can be used; under $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ it has an F-distribution with $\tau-1$ and $N-\tau-1$ degrees of freedom, and gives the standard F-test for testing equality of variances. One could also obtain a confidence interval estimate for the ratio of variances which would give an indication of the magnitude of change in variance.

The above described two sample t-test and F-test for testing equality of means and equality of variances, respectively, requires an assumption of normality. There are nonparametric techniques for testing the equality of location parameters (such as means) and the equality of scale parameters (such as standard deviations) that do not require the normality assumption but these will not be discussed.

If the normality assumption is retained and one assumes several known change epochs (rather than just one) one can readily generalize

from testing the equality of two means to that of testing the equality of several means. The resulting test is that of a one-way analysis of variance. Likewise, one can generalize from testing the equality of two variances to testing the equality of several variances.

Case of Independent--Time of Change Unknown

This is the case that has attracted considerable attention in the statistical literature. See Lee and Heghinian (1977), Sen and Srivastava (1975a, 1975b), Hinkley (1970), Gardner (1969), Kander and Zacks (1966), and Chernoff and Zacks (1964).

Consider the following model. Let

$$\begin{aligned} Y_j &= \theta_1(j) + E_j, & j &= 1, \dots, \tau \\ Y_j &= \theta_2(j) + E_j, & j &= \tau+1, \dots, N \end{aligned} \quad (18)$$

where $\{E_t\}$ is a sequence of uncorrelated error terms with zero mean, and $\theta_1(j)$ represents a mean function for the first part of the series and $\theta_2(j)$ represents the same for the last part.

Interesting special cases are

$$\theta_1(j) = \mu_1 \quad \text{and} \quad \theta_2(j) = \mu_2, \quad (19)$$

and

$$\theta_1(j) = \alpha_1 + B_1 z_j \quad \text{and} \quad \theta_2(j) = \alpha_2 + B_2 z_j; \quad (20)$$

the first assumes two constant means and the second assumes two regression functions.

Hinkley (1970) derived the asymptotic distribution of the maximum likelihood estimator (MLE) of τ for Eq. (19) where μ_1 and μ_2 were assumed known but the distribution of the $\{E_j\}$ was assumed arbitrary. There is no explicit formula for the maximum likelihood estimator of τ for this case. It turns out that if the $\{E_j\}$ are assumed normally

distributed with unknown variance, the asymptotic distribution of the MLE of τ with μ_1 and μ_2 unknown is the same as that for μ_1 and μ_2 known. This paper provides an example of an approach to the problem of detection of change using the likelihood principle. The results allow for inferences of the estimation or testing type. Pertinent statistics are based on cumulative sums or random walks.

Sen and Srivastava (1975a, 1975b) considered the same problem as in Eq. (19) and proposed statistics for testing $\mu_1 = \mu_2$ under various assumptions regarding whether or not the other parameters are known. Chernoff and Zacks (1964), Kanders and Zacks (1966), and Gardner (1969) all consider similar problems from a Bayesian point of view.

Lee and Heghinian (1977) consider the following setup:

$$Y_j = \begin{cases} \mu + E_j & , j = 1, 2, \dots, \tau \\ \mu + \delta + E_j & , j = \tau + 1, \dots, N \end{cases} \quad (21)$$

where the $\{E_j\}$ are iid normally distributed with mean zero and variance σ^2 , where τ , μ , δ , and σ are all unknown parameters. They derive the joint and marginal posterior distributions of τ and δ , the point of change and amount of change, respectively. The following priors are used: τ is assumed uniform over $1, 2, \dots, N-1$, δ and μ are each assumed normal with zero means but different variances and σ is assumed distributed proportional to the inverse of σ and all are assumed independent. Also $\sigma^2/N \ll \sigma_\mu^2$ and $\sigma^2 \ll \sigma_\delta^2$. The joint posterior of τ and σ is given by

$$f(\tau, \delta | Y_1 = y_1, \dots, Y_N = y_N) \propto \frac{1}{\{H(\tau) + [\tau(N-\tau)(\delta - \delta_\tau)^2]/N\}^{-(N-1)/2}} \quad (22)$$

for $-\infty < \delta < \infty$ and $\tau = 1, \dots, N-1$, where

$$H(\tau) = \sum_{i=1}^{\tau} (y_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=\tau+1}^N (y_i - \bar{y}_{N-\tau})^2$$

$$\hat{\delta}_\tau = \bar{y}_{N-\tau} - \bar{y}_\tau = (1/(N-\tau)) \sum_{i=\tau+1}^N y_i + (1/\tau) \sum_{i=1}^{\tau} y_i$$

From the joint posterior, the marginal posteriors are readily obtained. On the basis of these posterior distributions one can readily make inferences regarding τ and δ . The posterior distribution of τ is given by

$$f(\tau | Y_1 = y_1, \dots, Y_N = y_N) \propto \frac{[N/(\tau(N-\tau))]^{1/2} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{\tau} (y_i - \bar{y}_\tau)^2 + \sum_{i=\tau+1}^N (y_i - \bar{y}_{N-\tau})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \right\}^{-(N-2)/2}}{\quad} \quad (23)$$

for $\tau = 1, 2, \dots, N-1$.

Similarly, the posterior distribution of the amount of change is given by

$$f(\delta | Y_1 = y_1, \dots, Y_N = y_N) \propto \sum_{\tau=1}^{N-1} f(\tau, \delta | Y_1 = y_1, \dots, Y_N = y_N)$$

As an example of the above, consider the annual precipitation data for the 20-year period (1950-1969) for Spencer, West Virginia. The data was taken from Chang and Lee (1974), see Table 1. From Table 1 it can be seen that the records show the precipitation heavier for the first part than the second. The posterior distribution of time of change gives

Table 3. Posterior distribution of the amount of change for the annual precipitation at Spencer, West Virginia.

AMOUNT	DISTRIBUTION		
-546.000	.001	.000	.006
-535.000	.001	10.020	.005
-524.160	.002	21.840	.004
-513.240	.002	32.760	.004
-502.320	.002	43.680	.003
-491.400	.002	54.600	.002
-480.480	.002	65.520	.002
-469.560	.003	76.440	.002
-458.640	.003	87.360	.001
-447.720	.003	98.280	.001
-436.800	.003	109.200	.001
-425.880	.004	120.120	.001
-414.960	.004	131.040	.001
-404.040	.005	141.960	.000
-393.120	.005	152.880	.000
-382.200	.006	163.800	.000
-371.280	.007	174.720	.000
-360.360	.008	185.640	.000
-349.440	.009	196.560	.000
-338.520	.010	207.480	.000
-327.600	.012	218.400	.000
-316.680	.014	229.320	.000
-305.760	.016	240.240	.000
-294.840	.019	251.160	.000
-283.920	.021	262.080	.000
-273.000	.025	273.000	.000
-262.080	.028	283.920	.000
-251.160	.032	294.840	.000
-240.240	.036	305.760	.000
-229.320	.039	316.680	.000
-218.400	.043	327.600	.000
-207.480	.046	338.520	.000
-196.560	.048	349.440	.000
-185.640	.049	360.360	.000
-174.720	.049	371.280	.000
-163.800	.048	382.200	.000
-152.880	.047	393.120	.000
-141.960	.044	404.040	.000
-131.040	.041	414.960	.000
-120.120	.038	425.880	.000
-109.200	.034	436.800	.000
-98.280	.030	447.720	.000
-87.360	.026	458.640	.000
-76.440	.023	469.560	.000
-65.520	.019	480.480	.000
-54.600	.016	491.400	.000
-43.680	.014	502.320	.000
-32.760	.011	513.240	.000
-21.840	.010	524.160	.000
-10.920	.008	535.080	.000

MEAN OF THE DISTRIBUTION = -186.510

UPPER BAYESIAN LIMIT = 19.242
 LOWER BAYESIAN LIMIT = -434.127
 CONFIDENCE LEVEL = .950

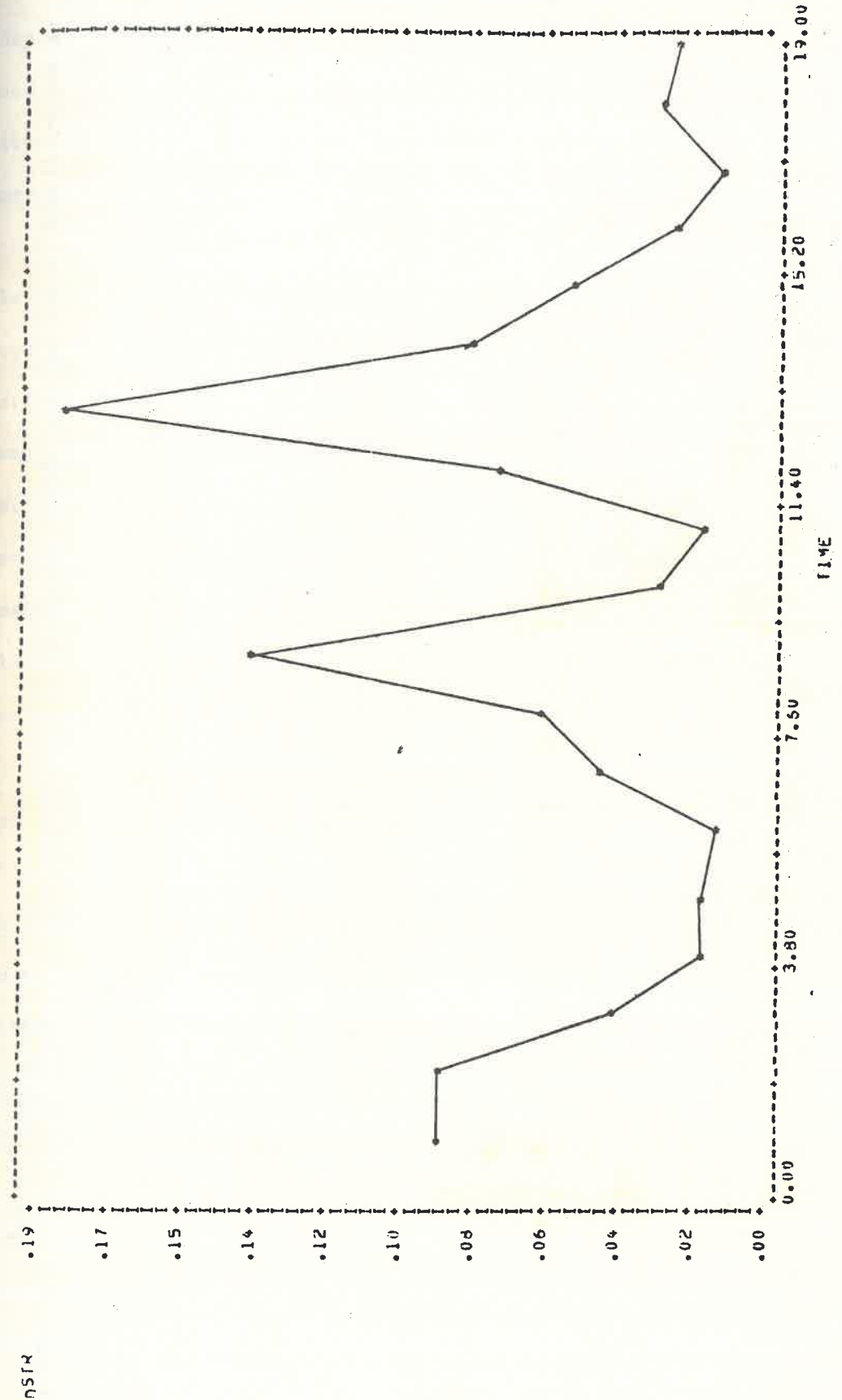


Figure 7. Plot of the posterior distribution of the time of change for the annual precipitation at Spencer, West Virginia.

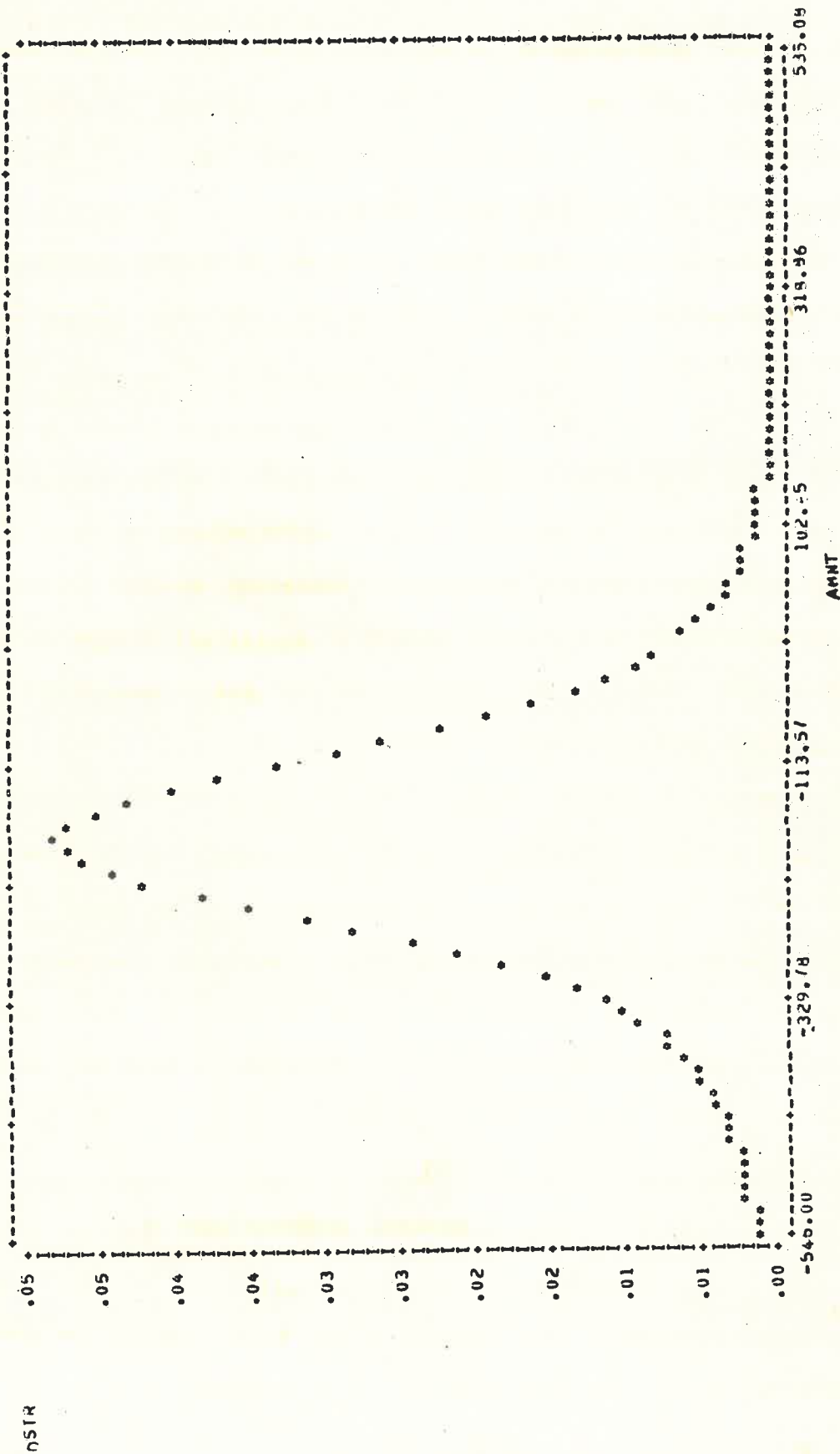


Figure 8. Plot of the posterior distribution of the amount of change for the annual precipitation at Spencer, West Virginia.

dependent (annual precipitation a possible exception), but at least occasionally the time series would be nonstationary. A type of stochastic model that allows for dependence as well as a mild form of nonstationarity is the so-called ARIMA model.

Box and Tiao (1965) were the first to attempt to detect a change in level of a nonstationary dependent time series. In their paper they considered an integrated moving average process. After this first attempt by Box and Tiao, the term intervention analysis caught on and was considered by many authors, (Box and Tiao, 1975; Hipel et al., 1975; Hipel et al., 1977; and Lettenmaier, 1976). Intervention analysis is a stochastic modeling technique designed to determine whether or not a natural or man-induced intervention causes a significant change in the level of a time series. Its applications in water resources are extensive, (Hipel et al., 1975).

The intervention analysis model to be described herein is capable of handling a seasonal component. As the term suggests, the time of "intervention" is usually known, so in the language of the above τ is known, although our description is different. Actually, the model is not so much a model as a building of a model in the usual Box-Jenkins terminology. That is one follows the iterative scheme of model identification, model fitting and diagnostic checking. We follow Box and Tiao (1975) and Hipel et al. (1975).

As before, let y_1, \dots, y_N represent observations of Y_1, \dots, Y_N . We model Y_1, \dots, Y_N , by modeling $\dots, Y_{j-1}, Y_j, Y_{j+1}, \dots$. Let Z_j = some appropriate transformation (for example, a log transformation or power transformation) of Y_j and work with the Z_j 's. Assume

$$Z_t = d(\kappa, \xi, t) + M_t, \quad t = \dots -1, 0, 1, \dots \quad (24)$$

where $d(\kappa, \xi, t)$ is the nonstochastic dynamic part of the model and includes the intervention component and M_t is the stochastic part of the model or "noise" term. The part $d(\kappa, \xi, t)$ can include deterministic effects, κ is a set of parameters indexing $d(\cdot, \cdot, \cdot)$, ξ a set of exogenous variables, and t the time index. The part $\{M_t\}$ will be modeled with an ARIMA model. That is, $\{M_t\}$ is modeled by an ARIMA, say

$$\phi(B)(1-B)^d M_t = \theta(B) A_t \quad (25)$$

where $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q$$

and $\{A_t\}$ is a sequence of iid $N(0, \sigma_A^2)$ random variables. B is the backward shift operator, i.e., $Bu_t = u_{t-1}$. The above ARIMA does not have a seasonal component.

The dynamic nonstochastic part of the model with general notation $d(\cdot, \cdot, \cdot)$ may clarify with some examples. Suppose, for instance, it is desired to represent only a step change of magnitude w between times τ and $\tau+1$, i.e.

$$Z_t = \begin{cases} M_t & \text{for } t = \dots, \tau-1, \tau \\ w + M_t & \text{for } t = \tau+1, \dots \end{cases} \quad (26)$$

then $d(\kappa, \xi, t) = wI_{\{\tau+1, \tau+2, \dots\}}(t)$, where

$$I_A(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t \in A \\ 0 & \text{if } t \notin A \end{cases} \text{ is the usual indicator of function.}$$

More generally, suppose there is a single exogenous variable, say $\{\xi_t\}$. Suppose that the transfer, say $\{v_t\}$, to the output from the input $\{\xi_t\}$ is generated by the linear difference equation

$$\delta(B) v_t = w(B) \xi_t \quad (27)$$

where $\delta(\cdot)$ and $w(\cdot)$ are polynomials similar to $\phi(\cdot)$ or $\theta(\cdot)$ i.e., $\delta(B) = 1 - \delta_1 B - \dots - \delta_r B^r$ and $w(B) = w_0 - w_1 B - \dots - w_s B^s$. Then

$$Z_t = v_t + M_t = (w(B)/\delta(B)) \xi_t + M_t \quad (28)$$

If $\xi_t = I_{\{\tau, \tau+1, \dots\}}(t)$, $\delta(B) \equiv 1$, and $w(B) \equiv wB$ then Eq. (28) reduces to Eq. (27). Thus, Eq. (28) is a convenient method of representing the effect of a single exogenous variable $\{\xi_t\}$. The most general representation of the dynamic nonstochastic function $d(\kappa, \xi, t)$ that we will consider is

$$d(\kappa, \xi, t) = \sum_{j=1}^k v_{tj} = \sum_{j=1}^k \{w_j(B)/\delta_j(B)\} \xi_{tj} \quad (29)$$

where $\{\xi_{t1}\}, \dots, \{\xi_{tk}\}$ represent k different exogenous variables (with a potential of k different changes). Here the parameters κ are the coefficients in the polynomials $w_j(B)$'s and $\delta_j(B)$'s. This is actually quite powerful representation for the dynamic component of $\{Y_t\}$ and is patterned after the modeling of the stochastic component. Suppose, for instance, there is a single intervention that takes effect gradually. The following v_t would do:

$$\frac{wB}{1 - \delta B} I_{\{\tau, \tau+1, \dots\}}(t)$$

with parameters w and δ . Note that v_t is given by

$$\begin{aligned} & wB(1 + \delta B + \delta^2 B^2 + \dots) I_{\{\tau, \tau+1, \dots\}}(t) \\ & = w(B + \delta B^2 + \delta^2 B^3 + \dots) I_{\{\tau, \tau+1, \dots\}}(t) \\ & = \begin{cases} 0 & \text{for } t = \tau, \tau-1, \tau-2, \dots \\ w & \text{for } t = \tau+1 \\ w(1+\delta) & \text{for } t = \tau+2 \\ w(1+\delta+\delta^2) & \text{for } t = \tau+3 \\ \vdots & \vdots \end{cases} \quad (30) \end{aligned}$$

which gives an immediate change of w and an ultimate change of $w/(1-\delta)$.

A procedure to follow in applying the above is: for a transform of the data from y_1, \dots, y_N to z_1, \dots, z_N restrict to models of the form

$$Y_t = \sum_{j=1}^k v_{tj} + M_t$$

Decide from physical considerations how many exogenous variables there are and how many interventions and the effect of the intervention. That is, identify the dynamic nonstochastic part of the model. Suppose, for illustrative purposes, that there is a single exogenous variable represented by an intervention between τ and $\tau+1$ that has a gradual effect that we assume is of the form of Eq. (30). We next need to identify the ARIMA model for the noise term $\{M_t\}$. Proceed as in Box and Jenkins (1976). That is identify a particular ARIMA model. Again, for illustrative purposes, suppose we try a stationary model ARMA(1,1) model, i.e., $d = 0$ and $p = q = 1$. We have parameters ϕ, θ , and σ_A^2 in our stochastic model. Now estimate the parameters of both the dynamic part and the stochastic part by the usual nonlinear least squares routine. For our illustrative example we get estimates of w, δ, ϕ, θ and σ_A^2 . This estimating of the parameters is fitting the model. Next do a diagnostic check by analyzing the residuals. If the check fails, modify the model accordingly and repeat.

Hipel et al. (1975) gives an example using annual flows of the Nile River surrounding the building of the Aswan Dam. The technique shows up well in all examples.

In summary, although the technique is not entirely objective and is computationally demanding, the so-called intervention analysis model

appears to be a way to go on detecting changes in hydrologic data. Any improvements in the so-called Box-Jenkins modeling will result in companion improvements in the intervention analysis.

A single example of an intervention analysis follows. The data is the 75 years of annual flows at Aswan of the Nile River as shown in Fig 9. An intervention consisting of a single step jump was assumed and the analysis performed. A jump of size -27.245 was estimated and an AR(1) model selected with estimated parameters $\hat{\phi} = \hat{\rho} = 0.131$. Diagnostic checks on the residuals were performed, and indications are that the identified model is adequate.

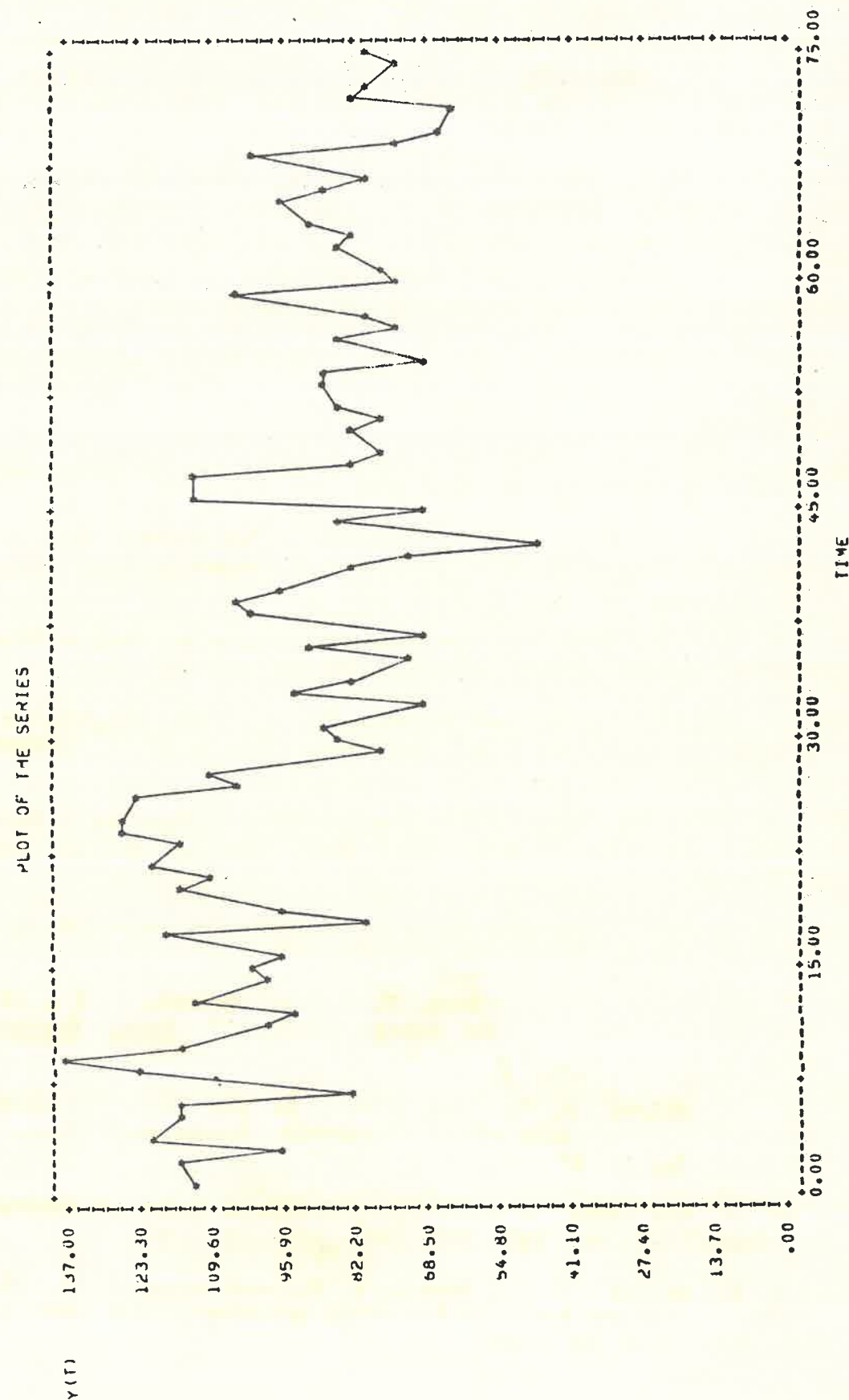


Figure 9. Annual streamflow series for the Nile River.

REFERENCES

Anderson, H. W., 1955, "Detecting Hydrologic Effects of Changes in Watershed Conditions by Double-Mass Analysis," *Trans. AGU*, Vol. 36, No. 1, February, pp. 119-125.

Bethlahmy, N., 1962, "Rapid Calibration of Watersheds for Hydrologic Studies," paper presented at the AGU Fall Meeting, Seattle, Washington.

Box, G. E. P. and Tiao, G. C., 1965, "A Change in Level of a Non-Stationary Time Series," *Biometrika*, 52, pp. 181-192.

Box, G. E. P. and Tiao, G. C., 1965, "Intervention Analysis with Applications to Economic and Environmental Problems," *Jour. of Am. Statist. Assoc.*, 70, pp. 70-79.

Chang, M. and Lee, R., 1974, "Objective Double-Mass Analysis," *Water Resources Research*, 10, pp. 1123-1126.

Chernoff, H. and Zacks, S., 1964, "Estimating the Current Mean of a Normal Distribution Which is Subjected to Changes in Time," *Annals Math. Statist.*, 35, pp. 999-1018.

Gardner, L. A., Jr., 1969, "On Detecting Changes in the Mean of Normal Variates," *Annals of Math. Statist.*, 40, pp. 116-126.

Hewlett, J. D., Lull, H. W., and Reinhart, K. G., 1969, "In Defense of Experimental Watersheds," *Wat. Res. Res.*, Vol. 5, No. 1, February, pp. 306-316.

Hibbert, A. R., 1969, "Water Yield Changes After Converting a Forest Catchment to Grass," *Wat. Res. Res.*, Vol. 5, No. 3, June, pp. 634-640.

Hinkley, D. V., 1970, "Inference about the Change-Point in a Sequence of Random Variables," *Biometrika*, 57, pp. 1-17.

Hipel, K. W., Lennox, W. C., Unny, T. E., and McLeod, A. I., 1975, "Intervention Analysis in Water Resources," *Water Resources Research*, 11, pp. 855-861.

Hipel, K. W., McLeod, A. I., and McBean, E. A., 1977, "Stochastic Modeling of the Effects of Reservoir Operation," *Jour. of Hydrology*, 32, pp. 97-113.

Holtan, H. N. and Lopez, N. C., 1971, "USDAHL-70 Model of Watershed Hydrology," U.S. Dep. Agr. Tech. Bull. 1435, pp. 1-84.

Holtan, H. N., Stilner, G. J., Hensen, W. H., and Lopez, N. C., 1975, "USDAHL-74 Revised Model of Watershed Hydrology," U.S. Dep. Agr. Tech. Bull. 1518, pp. 1-99.

- Kander, F. and Zachs, S., 1966, "Test Procedures for Possible Changes in Parameters of Statistical Distributions Occurring of Unknown Time Points," Annals of Math. Statist., 37, pp. 1196-1210.
- Kovner, J. L. and Evans, T. C., 1957, "A Method for Determining the Minimum Duration of Watershed Experiments," Trans. AGU, Vol. 35, No. 4, August, pp. 608-612.
- Langford, K. J. and McGuinness, J. L., 1976, "A Comparison of Modeling and Statistical Evaluation of Hydrologic Change," Water Resources Research, Vol. 12, No. 6, December, pp. 1322-1324.
- Lee, Austin, F. S. and Heghinian, S. M., 1977, "A Shift of the Mean Level in a Sequence of Independent Normal Random Variables -- A Bayesian Approach," Technometrics, 19, pp. 509-506.
- Leibsch, H., 1972, "Results of Research on Some Experimental Basins in The Upper Harz Mountains (Federal Republic of Germany)," in Proceedings of the Symposium on The Results of Research on Representative and Experimental Basins, Vol. II, IAHS, Pub. 97, pp. 150-161.
- Lettenmaier, D. P., 1976, "Application of Intervention Analysis to Environmental Impact Assessment," presented at Symposium on Methodologies for Environmental Assessments in Energy Development Regions.
- Nakano, H., 1965, "Effects of Changes of Forest Conditions on Water Yield, Peak Flow and Direct Runoff of Small Watersheds in Japan," Proceedings of the Int. Symp. on Forest Hydrology held at Pennsylvania State University, Pergamon Press, pp. 551-564.
- Reigner, I. C., 1964, "Calibrating a Watershed," U.S. Forest Service, Res. Pap. NE-15, Northeast Forest Experiment Station, 45 p.
- Reinhart, K. G., 1958, "Calibration of Five Small Forested Watersheds," Trans. AGU, Vol. 39, No. 5, October, pp. 933-936.
- Reinhart, K. G., 1965, "Watershed Calibration Methods," Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology, held at Pennsylvania State University, Pergamon Press, pp. 715-723.
- Scarf, F., 1972, "Hydrologic Effects of Cultural Changes at Moutere Experimental Basin," in Proceedings of the Symposium on The Results of Research on Representative and Experimental Basins, Vol. II, IAHS, Pub. 97, pp. 170-186.
- Sen, A. and Srivastava, M. S., 1975, "Some One-Sided Tests for Change in Level," Technometrics, 17, 61-64.
- Sen, A. and Srivastava, M. S., 1975, "On Tests for Detecting Change in Mean," Annals of Statistics, 3, 98-108.
- Storey, H. C., Hobba, R. L., and Rosa, J. M., 1964, "Hydrology of Forest Lands and Rangelands," in Handbook of Applied Hydrology, Ed. by V. T. Chow, Sect. 22, pp. 22-1 to 22-52.

REFERENCES

- Anderson, H. W., 1955, "Detecting Hydrologic Effects of Changes in Watershed Conditions by Double-Mass Analysis," Trans. AGU, Vol. 36, No. 1, February, pp. 119-125.
- Bethlahmy, N., 1962, "Rapid Calibration of Watersheds for Hydrologic Studies," paper presented at the AGU Fall Meeting, Seattle, Washington.
- Box, G. E. P. and Tiao, G. C., 1965, "A Change in Level of a Non-Stationary Time Series," Biometrika, 52, pp. 181-192.
- Box, G. E. P. and Tiao, G. C., 1965, "Intervention Analysis with Applications to Economic and Environmental Problems," Jour. of Am. Statist. Assoc., 70, pp. 70-79.
- Chang, M. and Lee, R., 1974, "Objective Double-Mass Analysis," Water Resources Research, 10, pp. 1123-1126.
- Chernoff, H. and Zacks, S., 1964, "Estimating the Current Mean of a Normal Distribution Which is Subjected to Changes in Time," Annals Math. Statist., 35, pp. 999-1018.
- Gardner, L. A., Jr., 1969, "On Detecting Changes in the Mean of Normal Variates," Annals of Math. Statist., 40, pp. 116-126.
- Hewlett, J. D., Lull, H. W., and Reinhart, K. G., 1969, "In Defense of Experimental Watersheds," Wat. Res. Res., Vol. 5, No. 1, February, pp. 306-316.
- Hibbert, A. R., 1969, "Water Yield Changes After Converting a Forest Catchment to Grass," Wat. Res. Res., Vol. 5, No. 3, June, pp. 634-640.
- Hinkley, D. V., 1970, "Inference about the Change-Point in a Sequence of Random Variables," Biometrika, 57, pp. 1-17.
- Hipel, K. W., Lennox, W. C., Unny, T. E., and McLeod, A. I., 1975, "Intervention Analysis in Water Resources," Water Resources Research, 11, pp. 855-861.
- Hipel, K. W., McLeod, A. I., and McBean, E. A., 1977, "Stochastic Modeling of the Effects of Reservoir Operation," Jour. of Hydrology, 32, pp. 97-113.
- Holtan, H. N. and Lopez, N. C., 1971, "USDAHL-70 Model of Watershed Hydrology," U.S. Dep. Agr. Tech. Bull. 1435, pp. 1-84.
- Holtan, H. N., Stilner, G. J., Hensen, W. H., and Lopez, N. C., 1975, "USDAHL-74 Revised Model of Watershed Hydrology," U.S. Dep. Agr. Tech. Bull. 1518, pp. 1-99.

- Kander, F. and Zachs, S., 1966, "Test Procedures for Possible Changes in Parameters of Statistical Distributions Occurring of Unknown Time Points," Annals of Math. Statist., 37, pp. 1196-1210.
- Kovner, J. L. and Evans, T. C., 1957, "A Method for Determining the Minimum Duration of Watershed Experiments," Trans. AGU, Vol. 35, No. 4, August, pp. 608-612.
- Langford, K. J. and McGuinness, J. L., 1976, "A Comparison of Modeling and Statistical Evaluation of Hydrologic Change," Water Resources Research, Vol. 12, No. 6, December, pp. 1322-1324.
- Lee, Austin, F. S. and Heghinian, S. M., 1977, "A Shift of the Mean Level in a Sequence of Independent Normal Random Variables -- A Bayesian Approach," Technometrics, 19, pp. 509-506.
- Leibschner, H., 1972, "Results of Research on Some Experimental Basins in The Upper Harz Mountains (Federal Republic of Germany)," in Proceedings of the Symposium on The Results of Research on Representative and Experimental Basins," Vol. II, IAHS, Pub. 97, pp. 150-161.
- Lettenmaier, D. P., 1976, "Application of Intervention Analysis to Environmental Impact Assessment," presented at Symposium on Methodologies for Environmental Assessments in Energy Development Regions.
- Nakano, H., 1965, "Effects of Changes of Forest Conditions on Water Yield, Peak Flow and Direct Runoff of Small Watersheds in Japan," Proceedings of the Int. Symp. on Forest Hydrology held at Pennsylvania State University, Pergamon Press, pp. 551-564.
- Reigner, I. C., 1964, "Calibrating a Watershed," U.S. Forest Service, Res. Pap. NE-15, Northeast Forest Experiment Station, 45 p.
- Reinhart, K. G., 1958, "Calibration of Five Small Forested Watersheds," Trans. AGU, Vol. 39, No. 5, October, pp. 933-936.
- Reinhart, K. G., 1965, "Watershed Calibration Methods," Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology, held at Pennsylvania State University, Pergamon Press, pp. 715-723.
- Scarf, F., 1972, "Hydrologic Effects of Cultural Changes at Moutere Experimental Basin," in Proceedings of the Symposium on The Results of Research on Representative and Experimental Basins, Vol. II, IAHS, Pub. 97, pp. 170-186.
- Sen, A. and Srivastava, M. S., 1975, "Some One-Sided Tests for Change in Level," Technometrics, 17, 61-64.
- Sen, A. and Srivastava, M. S., 1975, "On Tests for Detecting Change in Mean," Annals of Statistics, 3, 98-108.
- Storey, H. C., Hobba, R. L., and Rosa, J. M., 1964, "Hydrology of Forest Lands and Rangelands," in Handbook of Applied Hydrology, Ed. by V. T. Chow, Sect. 22, pp. 22-1 to 22-52.

- Striffler, W. D., 1965, "The Selection of Experimental Watersheds and Methods in Disturbed Forest Areas," Proceedings of the Symposium of Budapest on Representative and Experimental Areas," IAHS, Pub. 66, pp. 464-473.
- Swank, W. T. and Miner, N. H., 1968, "Conversion of Hardwood-Covered Watersheds to White Pine Reduces Water Yield," Water Resources Research, Vol. 4, No. 5, October, pp. 947-954.
- Wigbout, M., 1973, "Limitations in the Use of Double-Mass Curves," Jour. of Hydrology, 12, 132-138.
- Wilm, H. G., 1944, "Statistical Control of Hydrologic Data from Experimental Watersheds," Trans. AGU, Pt. 2, pp. 618-622.
- Wilm, H. G., 1949, "How Long Should Experimental Watersheds Be Calibrated?" Trans. AGU, Vol. 30, No. 2, April, pp. 272-278.
- Yates, M. E., 1972, "Effects of Cultural Changes on Makara Experimental Basin: Hydrological and Agricultural Production Effects of Two Levels of Grazing on Unimproved and Improved Small Catchments," in Proceedings of the Symposium on The Results of Research on Representative and Experimental Basins, Vol. II, IAHS, Pub. 97, pp. 148-169.

RESEARCH ORIENTED WORKSHOP ON EXPERIMENTAL WATERSHEDS

U.S. - Uruguay Bilateral Cooperation

MATHEMATICAL MODELS: RESEARCH TOOLS FOR EXPERIMENTAL WATERSHEDS

by

Donn G. DeCoursey
Research Leader
Hydro-Ecosystem Research Unit
Fort Collins, Colorado, U.S.A.

Interpretive Summary

This paper describes how mathematical models are needed to design the instrumentation of a research watershed. It stresses the fact that both the models and research watershed should be directed to decision makers' needs. The problems we face are now both long term and global in nature requiring physically descriptive models. The paper describes how concurrent development of the models and watershed operation will aid in both design of the experiments and model development and testing.

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

MATHEMATICAL MODELS:
RESEACH TOOLS FOR EXPERIMENTAL WATERSHEDS

Dr. Doon De Coursey

Montevideo-Uruguay

RESEARCH ORIENTED WORKSHOP ON EXPERIMENTAL WATERSHEDS

U.S. - Uruguay Bilateral Cooperation

MATHEMATICAL MODELS: RESEARCH TOOLS FOR EXPERIMENTAL WATERSHEDS

by

Donn G. DeCoursey
Research Leader
Hydro-Ecosystem Research Unit
Fort Collins, Colorado, U.S.A.

Abstract

Concurrent development of hydrologic models and research watersheds is necessary for adequate development of both. The models developed and objectives used in setting up a research watershed must be centered on the needs of the decision maker. The impact of human activity on hydrologic response has increased to the point that long-term global impacts are being felt. Thus the tools that the decision maker needs to make adequate decisions are different than they were a few years ago. Causal models that include probability distributions of input parameters are needed to respond to the problems we now face. Models that are developed concurrently with the field experiments, will be used to study the research site, select appropriate parameters, evaluate the accuracy and precision required of variables and parameters, evaluate the significance of spatial and temporal representativeness, and illustrate the concepts of time-space trade off.

1. INTRODUCTION

The title of this essay may be somewhat misleading. It infers that mathematical models are subservient to experimental watersheds when in fact they should be parallel. It is impossible to develop an experimental watershed without a concept of the hydrologic system and what must be measured. In almost all cases, excepting only the very simple, this concept takes the form of an analytical expression; a model. Thus, prior to development of an experimental watershed, a statement must be prepared describing what the experimental watershed is to accomplish; what its mission, objective, or purpose for existence is; and how the challenge is to be met.

In the following presentation the role of the decision maker or natural resource manager in defining the structure of the mathematical model and experimental watershed is described. Also discussed is the influence of man on the hydrologic cycle and how it affects our approach to modeling activity. Several examples illustrate the synergism between mathematical models and use or development of experimental watersheds.

2. THE ROLE OF THE DECISION MAKER IN WATERSHED RESEARCH

Before pursuing the subject of the interaction of mathematical models and experimental watersheds I would like to discuss mathematical models and their role in decision making. Hewlett (1980) in a keynote address at a Workshop on the Effect of Rural Land Use and Catchment Management on Water Resources, divides hydrologic models into three broad categories: Stochastic, Deterministic, and Decision models. He considers them primarily stochastic if the output is expected to vary because some element of the input has a known or predictable distribution. Deterministic models simulate all the hydrologic processes mechanistically. Decision models are designed to yield useful answers to economic or managerial type questions. Normally when we are classifying models we do not consider the term "decision" as one of the classifications. Whether we use the term or not is not important as long as we recognize that the need for such models exists. Except for trivial arguments of the need for research to further the science of hydrology the ultimate end product of hydrologic research (watershed science and modeling included) is the development of tools to improve the manager or decision maker's ability to make sound decisions. Hewlett (1980) described this very effectively:

"Here then lies one clear role for research: What models, descriptive relationships or facts are needed to advance the art of decisionmaking? What decision models are used now? Do they properly embrace the goals of management? Do they recognize all feasible alternatives? Do they include the essential constraints and facts? Are they broadly normative," (normative models consist of components that describe the state of the hydrologic system) "as is multiple use, or scientifically normative, as in linear programming, with strategies, states of nature, and feed-back mechanisms arrayed against a hierarchy of specified goals? The need for research emerges clearly when the decision model in use fails to distinguish between the efficiency of several possible management strategies, or fails to predict with useful accuracy the outcomes from different strategies."

Use of water supplies world wide continues to grow, diminishing excess supplies; thus it becomes increasingly important that we manage existing supplies with greatest possible efficiency. Until recently the time scale and aerial extent of hydrologic projects have been such that our knowledge and forecast ability have been able to provide reasonable guidance. However, the effects of human activity are now a part of the hydrologic cycle - both quality and quantity are of concern, being affected by it and affecting it (Matalas et al., 1982). The National Research Council (1982) identifies several long-term and large scale water management problems in the United States, that are also applicable world wide: These are (1) groundwater contamination due to toxic and nuclear-waste disposal; (2) nonpoint sources of pollution on stream systems; (3) impacts of change in both flow and water quality on the aquatic ecosystem; (4) the frequency, duration and impacts of drought, including long-term trends toward desertification; (5) long-term hydrologic budgets for assessing the adequacy of regional or national water resources; (6) global geochemical cycles such as the fate of nitrogen and sulfur (e.g. acid rain); and (7) protection of engineered systems (e.g. nuclear power plants) against hydrologic extrema. Thus with dwindling supplies and the influence of man to deal with, projecting the impact of water related projects becomes more important. What is going to be the long term impact? Is it likely that the collective effect of a series of projects could have a global effect? We are intensifying the use of the hydrosphere for storage, detoxification, and assimilation of wastes; energy production, intensive agricultural development, and urbanization have the potential of producing global hydrologic effects; and possibilities of climatic change have shifted much of the emphasis in prediction to long-term

hydrologic phenomena. Except for a superficial evaluation, existing methodology are not designed to answer these questions. Yet these large-scale, long-term problems involve large investments and the health and well-being of much of the worlds population. Thus they demand increasingly precise and accurate predictive statements.

With respect to the decision maker, the Congress of the United States recognized the impact that mathematical models has had on the successful management and planning of water resources. They instructed the Office of Technology Assessment (OTA) to assess the Nations ability to use models efficiently and effectively in analyzing and solving their water resource problems and make recommendations for improving the use of available technologies. The OTA Report (1982) presented the United States Congress with an assessment that is applicable worldwide. The over-riding concerns are similar and the needs are about the same in many countries therefore I have prepared the following summary of that report. The OTA report (1982) found that: "Mathematical models have significantly expanded the Nations ability to understand and manage its water resources" ... "models have increased the accuracy of estimates of future events" ... "They have made possible, analyses that could not be performed empirically or without computer assistance" ... "Models are often the best available alternative for analyzing complex resource problems. While many of the economic and social factors in water resource decision cannot be fully enumerated, models can be used to integrate the available data, and provide estimates of future effects and activities." "Models have the potential to provide even greater benefits for water resource decisionmaking in the future." ... "they will be able to increase the efficiency of water resource management and encourage cost-effective decisionmaking." The office of technology assessment also found that many of the analytical tools needed to aid the decisionmaker were not available and that there was no overall strategy for developing, using, disseminating and maintaining these tools. Thus this remains a very high priority need of water resource management and decisionmakers. Under the Water Research and Development Act of 1978, the capability for assessment, planning, and policy formulation were to be strengthened. However, OTA found that "by concentrating primarily on research needs, it misdirects mission agency priorities toward research per se rather than toward coordinated development and utilization of scientific knowledge and related

analytic capabilities." This material has been presented to stress the need that adequate consideration be given the decision maker at the time that both the model concept and research watershed are being developed.

3. MATHEMATICAL MODELS AND PRESENT DAY HYDROLOGIC ISSUES

The literature is replete with descriptions of many types of hydrologic models. I am going to assume that it is not necessary to attempt to categorize and define the variety of models that exist except as necessary to relate hydrologic modeling to the development of experimental watersheds. In this section of the essay I am going to summarize and quote extensively from a recent publication, Scientific Basis of Water-Resource Management, by the National Research Council (NRC) (1982). The purpose of the study presented in this book is to provide assessments, from the scientific community, to aid policymakers in decisions on water related societal problems. The study was motivated by the need for substantial improvements in the hydrologic sciences to enable more firmly based decisions involving water. The book contains a series of eleven essays on all aspects of the hydrologic cycle written by a panel of well known scientists. The report also contains an Overview and Recommendations that summarize the highlights of the eleven essays and formulates conclusions and recommendations. The entire report is pertinent to the objectives of this Workshop and I recommend that it be read by any one considering the development of an experimental watershed. It very aptly describes the gaps in knowledge and data base development needed to develop the tools needed by our water resource management and decision makers.

An Overview of the eleven papers develops the need for new material by describing problems and the differences in approaches with emphasis on gaps in our scientific understanding. The overview emphasizes the development of causal models but also recognizes the need for empirical models. It presents a summary of its findings and arguments for further understanding the elements of hydrology and for dealing with the problems of hydrologic scale. Because these are so pertinent to research watershed development the following is abstracted from the NCR report.

The seven long-term large-scale hydrologic problems, identified previously, involve large investments and the health and well-being of much of the world's population, thus they set the stage for the need to develop new and improved analytical procedures. They also emphasize the problems

and differences in approaches that are currently in use. Three significant examples are:

1. The difference in viewpoint and practice between empirical and causal models. Empirical models, frequently used with today's problems, require continuous updating and fitting to on-site data. They are very difficult to extrapolate beyond range of the data or to transfer from one time or place to another. Causal models, based on physical principles, can, in theory, incorporate the effects of change in the environment. In principle they are also transferable in space and time. From an operational point of view hydrologic determinism incorporates both causal relations and statistical relations. Thus statistical relations provide information and a means of incorporating uncertainties.

2. The difference between models for prediction and understanding. Generally prediction is directed toward immediate needs and may use whatever is practical. Understanding is oriented toward improved ability to explain the response of events in both space and time. These should be combined because progress in predicting the performance of complex systems requires both.

3. The solution of most problems is focused at the local spatial and temporal scale with little thought given to the global hydrologic scale of which they are a part.

These three controversies are important in both mathematical model and research watershed development and focus attention on the difference between a short-run and long-run evaluation. The differences are important because short-term forecasts are insensitive to many imperfections that are intolerable in long-range schemes. Because the investment in major water resources projects is so great, it becomes almost impossible to discard one project in favor of a significantly different alternative. Thus accurate assessment of risk is becoming increasingly important and management decision making critical. We must be able to accurately project the long-term "before and after" effects of these projects on the societal and hydrologic environment, because of the possible irreversible, unanticipated effects, perhaps on a global scale such as on climate, water chemistry, and land erosion. These types of projects, the complexity of the hydrologic system, and the long time over which they must be evaluated require that we continue to develop and improve causal models of the entire hydrologic system. The report goes

on to state that substantial improvements in hydrologic science are necessary, i.e. conjunctive use of surface and groundwater; water and chemical transport through the vadose zone; improved understanding of the interaction of physical, chemical, and biological components; and improvements in statistical and probabilistic modeling techniques.

The report identifies three major findings:

1. Neither empirical-optimization models nor increased causal understanding alone will enable hydrologists to respond with necessary effectiveness to current societal demands--a combination of the two is required. Even though the report emphasizes causal understanding, most hydrologic problems occur at intermediate scales that will require a blending of the two.

2. The second finding of the NCR report is that problems of hydrologic scale impact not only scientific alternatives and research direction but also the management of water-resource systems. Explanations and predictions that must be made, if we are to respond to the emerging problems previously described, require that we identify the dimensions in time and space along which they must hold if they are to be satisfactory.

Previous discussion emphasizes the need to concentrate on basic or fundamental research which is at the microscale. Frequently it is assumed that by linking microscale solutions to form a causal chain that we will be able to examine problems at the macroscale. Unfortunately it seldom happens that way; at some scale or characteristic dimension, mechanistic dimension breaks down and we must resort to unverified causal and statistical or probabilistic components.

The watershed is frequently taken as a convenient unit in hydrologic analyses and we represent, the fundamental processes as fluxes connecting sets of storage reservoirs. It is unreasonable to assume that we can use the same set of expressions and parameters for watersheds of all sizes. We need some measure of hydrologic scale that can help discriminate among alternative forms of analysis and aid in optimal development of causal tools at all watershed scales.

3. The third finding is that we must recognize the institutional constraints within which we operate and work toward minimizing the problems they present. Following are some examples: (1) Some institutions collect data whereas others cannot collect it but need it. This leads to problems

of fragmented and incomplete data bases. (2) Watersheds and political boundaries rarely coincide. (3) Some institutions deal with water quality and others with water quantity.

3.1 EMPIRICAL VS CAUSAL MODELS

In a further discussion of the first of the three findings Klemes (1982) presents an excellent discussion of empirical and causal models used in hydrologic evaluation. He discusses the advantages and disadvantages of each. Empirical models, he says, are generally based on observations of change in one quantity that corresponds to a change in another quantity. They are of necessity simple and lead to limited knowledge and understanding, that tell us what happens but do not derive the outcome from the dynamic mechanisms governing the process. The merits of empirical models are (1) possibility of developing them without much understanding of the modeled phenomenon, (2) simplicity which is achieved by short-circuiting complex causal chains and (3) potential for making collected data usable without much delay and hence a high cost effectiveness. The demerits of such models are (1) attempts to improve the model without additional data that lead to overfitting or concentration on unimportant aspects, (2) they have no justification outside the range of underlying data sets--extrapolation involves risk of large errors, (3) uncertainty about model structure leads to false assumptions about cause and effect, (4) arbitrariness in form of the model can lead to adoption of a basically wrong approach, and (5) the availability of input/output data and lack of understanding tend to lead to a "let-the-data-speak-for-themselves" philosophy that can be misleading or untenable. With these rather weak merits and strong demerits one wonders why they appear to work. Klemes suggests that they work because: (1) they are essentially an interpolation formula, (2) they represent only small well understood components, (3) they are untestable, (4) decisions are insensitive to the embedded model, (5) they are irrelevant to results obtained, (6) by chance, the model is actually descriptive of the physical system, (7) reputation is based on superficial appearance, (8) they work for the wrong reasons, (9) they have not been adequately tested and are considered good by default, and (10) models that do not work are not published.

Looking at causal models Klemes described the disadvantage as the fact that they require large volumes of data and extensive basic research programs to test their concepts. It is also easy for a hydrologist, because of

the lack of knowledge in related fields (geology, biology, chemistry and climatology) and the extensive data requirements, to make short cuts that lead to empiricism and the model can degenerate to one that is a somewhat structured empirical model. Klemes describes the advantage of causal models as (1) the ability to derive the behavior of a hydrologic process for a given state of the system from dynamic mechanisms without recourse to calibration by empirical fitting. Thus they can be used to predict hydrologic response under conditions that did not exist during process-recorded history, (2) the inherent ability to assess the effects of environmental changes on water resources, (3) the potential to point out ways to efficient short cuts and thereby to better empirical models, (4) it is a way of systemizing research that can provide a rational methodology for hydrologic model use.

In the last few years the USDA - Agricultural Research Service (ARS) has made significant progress in the development of causal models. See DeCoursey (1982), Knisel (1980), Shaffer (1982), Wright (1983), and Williams (1983). These models vary considerably in the degree of causality and empiricism that is imbedded within them. However, it is generally a matter of temporal and spatial scale. What is one person's causal description is macroscopic and empirical in another's view. It must be asked if causal models are a necessary condition for formulating working hypotheses about macroscopic systems. Perhaps not. We are not arguing against understanding components of a causal chain, but rather suggesting that advances are made by an orderly alternation between theory and careful observation.

Time and space do not permit me to review the status of recent model development in various subject matter areas in hydrology, however, the eleven essays in the NCR Report and two recent AGU publications, U.S. National Reports on Hydrology, (AGU, 1979 and 1983) provide excellent reviews. Collectively they provide coverage of the entire field of hydrology including sedimentation and water quality. Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling held May 18-21, 1981 at Mississippi State University, Mississippi State, Mississippi provide a wealth of information. The subject matter for the symposium was divided into 26 topic areas and an invited speaker was asked to present a state of the art discussion in each of these areas. The proceedings appear as four separate hard-back Water Resources Publications (Singh, 1982a-d). Another very useful

publication is an American Society of Agricultural Engineers monograph on Hydrologic Modeling of Small Watersheds (Haan et al., 1982).

3.2 SCIENTIFIC ISSUES THAT MUST BE ADDRESSED

I will conclude this abstract of the NCR report with a brief description of some of the highest priority scientific issues that need to be addressed. These were prepared in the form of questions. Recent research (AGU, 1983) has indicated that various federal, state and private research groups are starting to direct efforts toward answering some of these questions, yet much remains to be done.

1. Can the concept of scale-temporal and spatial--be included in hydrology so that some of the processes can unambiguously and efficiently be studied and managed at one level and some at another?

2. How can chemistry and biology be coupled with our understanding of the physics of water movement? How can this understanding be applied to the management of groundwater and surface water quality?

3. What is the impact on the food web--and, ultimately, on human life--of toxic substances in water? Do the long-time horizons, explicit in the migration of toxic substances, impose the need for new methods of risk assessment?

4. Given various theoretical models, what advances and techniques are needed to measure and define statistically stable estimates of the requisite parameters? Are existing data sets adequate for both causal and statistical usage? What information needs to be collected to meet the requirements of both theoretical and applied hydrology?

5. Can models of sequentially dependent processes be linked satisfactorily to form a causal chain of understanding leading to optimal control and the predictive power necessary to address the relevant societal issues? Can existing data bases be manageably integrated to formulate and calibrate such chains of models and their parameters?

6. What is the proper role of statistics in developing and assessing models? How far should we press for predictive accuracy and precision? When is a model "good enough" for scientific understanding or engineering applications? At what scale should we strive for understanding hydrologic phenomena, and at what scale is empiricism adequate?

7. What algorithms should be used to design protective works and establish nonstructural defenses against hydrologic extremes? Instead of

concentrating on attempts to define a flood of a given return period we need to evaluate the socioeconomic consequences of protection against events 2 times, 5 times...etc. the maximum flood of record.

The seven scientific issues described above should be seriously considered at the time that a philosophy of research is developed to guide the development of a research watershed. The NCR report expands on these seven questions. The eleven papers that make up the body of the report very aptly describe the current state of knowledge in hydrology and how that knowledge base interacts with management and planning of our water resources. As such they should be extremely helpful in structuring data bases that will have maximum utility in water resource model development.

4. COORDINATION OF MODEL DEVELOPMENT AND FIELD DATA COLLECTION

In the previous section of this essay, issues involved in the selection of mathematical models were discussed. Emphasis was placed on the development of causal models oriented toward water resources decision makers' needs. Of equal importance to that of orientation of the model to the decision maker is the problem of model testing, i.e. data collection. Many of the essays in the NCR report stress the need for coordination of field data collection and model development.

In the last few years, field experiments have improved our understanding of the mechanics and the spatial variability of runoff processes, and stimulated the development of causal models of hydrologic processes. The causal models have in turn provoked better field research by providing unified interpretation of data from different environments and suggesting critical measurements that must be made. It is particularly important that this synergism between model development and field work continue. As we continue the development of causal models, field work is needed to verify that the model is an adequate description of the processes and that parameter values are correct and realistic. Cooperation in the design of field experiments and model development will also minimize the aimless collection of field data that has been so obvious in the past. Too many field experiments have been set up without any thought given to specifically how the data were to be used. They were designed to observe the hydrologic response when a change was made in some input or state variable. Frequently no thought was given to why the change in that input or state variable provoked the hydrologic response. As such the data were of limited value and of

almost no value in a predictive sense because of a lack of transferability of the data. Dunne (1983) stresses the need to strengthen this cooperative effort: "...the most vigorous and sophisticated current developments in hydrology are due to the efforts of researchers concerned with physically based mathematical models. However, this expanding frontier will be hollow unless it is matched by equally sophisticated field experiments to discover unexpected hydrologic phenomena, to develop new concepts about familiar processes, and to guide the development of mathematical models based on sound physical insights into field conditions."

Leopold (1983) aptly describes a field data source that many hydrologists have ignored. Geomorphologic field investigations can be used to much more advantage than they have in the past. Geomorphic investigations that include soil mechanics, pedology, stratigraphy, sediment deposition, and investigations into the hydraulic history recorded in bank and bed deposits can be of invaluable help in verifying mathematical models of channel hydraulics, channel bank and bed stability, and erosion and sediment transport.

The other NCR reports present additional examples of how and why hydrologic data collection must parallel model development.

5. MODEL STRUCTURE AND FIELD DATA COLLECTION

In my presentation I have emphasized the need for continual causal model development because this is where the most pressing problems are found. However, I have also stressed the point that our application models--those models developed for decision making--will very likely be a combination of causal and empirical models. Consequently, continued development of empirical models can be expected. However, we can expect them to be developed with the aid of causal models and to provide a means of bridging the scale problems previously described.

The causal--mechanistic descriptions--of hydrologic processes require more field data to develop test and verify than any other type of model. Thus I will confine my comments to their data requirements. Previous references to several causal models, AGU and ASAE publications, proceedings of Symposia and the eleven essays in the NCR report cite papers that describe excellent examples of causal models of hydrologic processes. Rather than try to describe the variety of data requirements needed for the different models I will show by a few examples what is needed.

The CREAMS model (Knisel, 1980) was developed to predict the hydrologic response of a field size area. The model assumes that a field is made up of a series of overland flow areas and channels. It is a lumped model in that it assumes uniform soils and climatic inputs for each overland flow plane or element and simulates the movement of water sediment and chemicals in and from the area. At the present time it is being updated and a fully dynamic version will be available. It is a good example of a causal type model. Following are some of the features of this and a companion model, showing inputs and how various components of the fully dynamic model are simulated.

1. Input climatic data -
 - rainfall - defined by breakpoint, i.e. short time interval intensities
 - solar energy - total daily values
 - temperature - average daily values
 - relative humidity - average daily values
 - pan evaporation - daily values (used as an alternative in ET calculations)
2. Infiltration - Smith-Parlange or Green and Ampt equations applied to a layered soils description - parameters obtained from soils data (soil-moisture-release curves)
3. Surface flow - kinematic solution of flow equations - requires description of flow cross section and resistance parameters
4. Erosion - rainfall and surface flow detachment
 - adjusts to flow history and management changes
 - transport capacity uses alternate expressions
5. Snow melt - uses inputs of degree day plus heat from soil
 - runoff from snow pack simulated
 - frozen soil calculated
6. Pondered flow conditions - complete routing through pondered area
8. Soil temperature - solves heat diffusion equation and accounts for water convection
9. Soil evaporation - linked to soil flux limits
10. Plant Growth - mechanistic model with heat, water and nutrient stress. Driven by radiation and degree days
11. Nutrient accounting - all components of nutrient cycles and carbon throughout soil profile accounted for in mechanistic models

12. Pesticide accounting - uses adsorption/desorption coefficients - accounted for by mechanistic approach throughout soil profile
13. Management practices supported - (feedback between all hydrologic components maintained) - standing to fallen residue conversion; double cropping, variable rotation; simulation of perennials; efficient specifications for cultivation, fertilization, irrigation, tile drainage, manure application and grazing

The first version of this model (note quite as comprehensive as the one described above) has been well received and U.S. Department of Agriculture-Soil Conservation Service staff members are being trained to use it. The dynamic version, described very briefly above, will be used in special studies. It is also the source area module of a small watershed model (DeCoursey, 1982). The small watershed model uses the above fully dynamic version of CREAMS to simulate all source areas in a small watershed. Water sediment and chemicals are routed through the channel system, and any impoundments, to a downstream point, adding groundwater if appropriate. Channel routing of water and sediments is fully dynamic; it simulates the selective removal and deposition of material by particle size fraction and provides for armor development if necessary. The reservoir submodel simulates sediment deposition, nutrient recycling, pesticide degradation and biological impacts. The groundwater component includes chemical transport.

It does not take much of an imagination to see the magnitude of the inputs required to use such models. However, material is being prepared to aid the user by identifying the less critical parameters and providing guidelines for parameter selection. It will be several years before this development is completed even though the basic structure and computer coding are nearly complete. Much testing remains to be done.

These examples are presented because they illustrate the tremendous data collection facilities that are required to develop and test such models. In this particular case the development and testing took place over several years. Data facilities at several locations were used to develop and test individual components. Cost of a complete data collection installation at one location would be prohibitive.

Freeze (1982) describes a hillslope model similar to the CREAMS model except that it does not contain all the nutrient and crop growth components.

It demonstrates the effects of spatial variability on hydrologic response by laying a grid over the surface of the hillslope and randomly assigning each element of the grid a different set of soil characteristics. The assigned values are representative of the range and correlation structure of values normally found in a field. The model with its assigned soil parameters was then used in a Monte Carlo experiment with synthetically generated rainfall characteristics. Output shows the variability that is frequently observed during a storm in a field--areas with no surface runoff--areas with surface runoff caused by low infiltration rates (Hortonian conditions) and areas where a high water table rises to the surface (Dunne mechanism) creating ponded conditions. It also shows how different parts of the hillslope respond to storms of different duration and intensity. Freeze tabulated the peak rates of output hydrographs from the area are simulated and plotted them on lognormal probability paper. Results of the study--the hydrographs produced--were very similar in peak, duration, lag, shape and volume to field catchments with similar soils properties. Freeze also used the model to demonstrate the significance of the soils properties on the hydrographs by using the same series of storms and the same underlying probability distribution of soils parameters, but generating different assignments for each of the grid elements. The resulting probability curves show a wide variety of different characteristics. At the narrowest point (50% probability), umbrella curves are nearly an order of magnitude apart. This shows the value of accurate soils information in estimating hydrologic response.

This discussion of the CREAMS, SWAM, and Freeze models is not intended to illustrate an example of an applications model or to suggest that all fields in a research watershed be instrumented to the extent necessary to define all their characteristics or sampled well enough to define all its spatial characteristics. It is to illustrate the use of detailed hydrologic models in the design of an experiment: i.e. (1) studying a research site; (2) selecting appropriate parameters to enable the experiment to accomplish its goal; (3) evaluating the accuracy and precision required of variables, characteristics and parameters; (4) studying the significance of spatial and temporal representativeness; and (5) illustrating time/space tradeoff in the value of additional data. Each of these factors will be discussed in the following sections using information from the previous examples.

On September 21-23, 1982 an International Symposium on Hydrological Research Basins and their Use in Water Resources Planning was held in Berne-Switzerland. The proceedings of that Symposium appeared as three separate volumes (Vischer and Emmenegger, 1982). The material presented in these proceedings is divided into: Data Acquisition and Management, Water and Heat Balance and Their Components, Rainfall-Runoff Processes, Nutrient and Sediment Budget and Meltwater Runoff, Application and Transfer of Results of Catchment Research to Water Resources Planning and Management. Collectively these papers present a good summary of watershed research throughout the world. Even though there are some excellent papers in the proceedings, the bulk of the papers presented indicated that much of the data collection supported empirical model development rather than causal models, thus indicating a lack of conceptual model development to aid in data collection. Hopefully the following sections will show why such development is needed.

5.1 STUDYING A RESEARCH SITE

Following is a brief description of a hypothetical situation that I will use to illustrate the use of a causal hydrologic model to aid in studying a research site. Assume that we have a small research catchment of about one hectare in a row crop. It is being used to study the erosion characteristics of the soil as an aid in development of an applications model that reflects different management conditions. The catchment has a mild slope to the outlet. The soil is assumed to be fairly uniform both in aerial extent and in depth, i.e. no impervious or restricting layers. Assume that we have characteristic soil moisture--conductivity--tension curves. We will further assume that initial instrumentation consists of a flow measuring station with a pumping sampler; a climatological station to measure rainfall, relative humidity, temperature, total incoming solar energy, and an evaporation pan; three tubes provide access for neutron measurements of the soil moisture conditions. As a guide for our field research we will use the dynamic version of the CREAMS model previously described.

Following is an example of how we can use the model in a synergistic way with the watershed data to both study the site and improve the model. Suppose that we have collected some data and attempted to simulate the response using the model and find that we are consistently underpredicting

the volume of surface runoff and over predicting the sediment concentrations. Assuming there is no error in measurements, the error in estimating the volume of surface runoff could be caused by one or a combination of several things. The soils map may be accurate, but even within a field of uniform soil type the saturated hydraulic conductivity probably varies over 2 to 3 orders of magnitude (Freeze, 1982). Thus it is highly unlikely that the soil moisture release curves of the particular soil are representative of the average (and what is average?) with this kind of variability each area is going to respond differently to the same rainfall and the "average" release curve will be different for each storm (Smith and Hebbert, 1979). Additional measurements of saturated conductivity will show whether the error is in this parameter or somewhere else. It will not be likely that all error in prediction can be eliminated by a redefinition of the saturated conductivity, but one may find that over the range of observed storms that "on-the-average", the new values are much closer.

Another source of error in predicting the volume of surface flow could be the model's estimate of initial soil moisture. If this were the problem the soil moisture record should have indicated it; the cause could be one of several things: (1) the model's crop evapotranspiration, ET, rates could be in error, (2) the problems cited previously concerning the soil characteristics could have influenced the model's handling of unsaturated flow during interstorm periods, (3) the effects of tillage on soil evaporation and soil water redistribution are not adequately modeled. Each of these problems could be investigated with additional instrumentation or sampling. For example, the use of net radiometers and additional measurements of wind, and air and wet bulb temperature should enable better estimation of transpiration and soil evaporation rates. Results of these additional studies could show that some component of crop growth or ET in the model was in error. It may also have been that the effect of tillage on soil evaporation had not been accurately estimated. We could go on and on speculating on the causes of problems such as those mentioned above, but that is not the point to be made. What I have attempted to do is show how a causal model such as described can be used to improve our understanding of the mechanisms taking place in a research catchment and how data from the catchment in turn aids in improving performance of the model. To obtain optimal benefit from a research catchment a causal description of the hydrologic processes involved must accompany the watershed development.

5.2 PARAMETER SELECTION

The previous example can be used to show the importance of appropriate parameter selection and evaluation. In the example, the model over predicted the sediment concentrations even though it underpredicted the runoff volume. Just as in the previous example, this may be caused by several factors: (1) the effect of tillage operations and subsequent reconsolidation as defined in the model is in error; (2) the estimate of tillage parameter values used in the model is in error; (3) parameters describing raindrop detachment, overland flow detachment, transport capacity, particle size characteristics, or the effects of canopy cover are either not being properly evaluated or the phenomena is not adequately described in the model. Solution to this problem is more difficult. Perhaps one of the best ways to start would be to perform sensitivity analyses on each of the parameters to find how much change in a parameter value would be needed to bring prediction in line with observation. In some cases it may not be possible, especially if the error is caused by more than one problem, but the procedure should enable the researcher to narrow down the list of possible causes. If error in prediction is caused by a fundamental problem in the detachment or entrainment components, it may be necessary to carry out laboratory or rainulator studies to look at individual subprocesses such as raindrop or rill-flow detachment. Let's assume in this case the problem is created by an improper assumption as to the effect of canopy cover on detachment by rainfall. Every plant has a characteristic drip pattern and energy level associated with the drops. Corn, for example, will funnel much of the water to the stalk where it runs down; only the ends of the leaves, beyond the break point, will drip. Some plants such as cotton will form a drip line somewhat inside the perimeter of the plant. If the leaves of a plant are close to the ground drops from the leaves will have very little energy. If canopy cover is relatively sparse it may have very little impact on natural rainfall erosion characteristics. Thus it is obvious that the model user must understand the role that the parameter plays and how to evaluate it. In this case, if the model did not have provision to modify the effect of raindrop impact for the effect of canopy cover, it would not have been possible to account for the effect of that component. If the component were missing, then error in model response would have been incorporated into some other parameter thus biasing parameter values, possibly making them unreasonable.

5.3 ACCURACY AND PRECISION OF VARIABLES, CHARACTERISTICS AND PARAMETERS

In situations similar to those described above, it is possible to determine the accuracy that the researcher should use in describing the variables, characteristics and parameters by a sensitivity analysis (Coleman and DeCoursey, 1976; and Saxton, 1975). If the model is completely analytical and continuous in the first derivative, then a partial derivative of the expression to be evaluated with respect to the variable or parameter in question will show the sensitivity of that variable or parameter. If the model is not completely analytical, then the same type information can be obtained by finite difference. If the model is relatively insensitive to one or more of the variables or parameters, the researcher should consider fixing it to the mean value or at least investigate its performance. It may be possible to reduce measurement frequency of a particular variable or stop data collection completely.

It is possible, by expressing sensitivity in terms relative to the magnitude of the phenomena in question (evapotranspiration rate, for example), to compare parameter sensitivity to alternative expressions. A plot of the relative sensitivity throughout the year will show how it changes with season depending upon the magnitude of the hydrologic process in question. A sensitivity analysis can also provide a measure of the overall error variance associated with measurement error. This is extremely useful in comparing alternate expressions and studying the effect of instrument error variance. See Coleman and DeCoursey (1976) for more information.

5.4 SPATIAL AND TEMPORAL REPRESENTATIVENESS

The degree to which a model should be spatially and temporally representative of the real world situation depends upon the ultimate use of the model. A basin scale model, designed for preliminary design, cannot be expected to be spatially or temporally variable. However, spatial and temporal effects should be built into the model's response by providing the user with realistic probability statements of performance. This will require that recommendations for values of input parameters be presented in the form of probability distributions that adequately represent the effect of spatial and temporal variability. The development of such models, which will probably be empirical in nature, should evolve from causal models so that they have a mechanistic structure that will enhance their application to a wide variety of situations. The SWAM and Freeze models, previously

described, are obviously much too complex in their present form for application type situations. The U.S. Department of Agriculture - Agricultural Research Service and Soil Conservation Service are now starting to refine SWAM and develop it into an applications model for small catchments. The next step will be the use of SWAM as a simulation tool to look at the best way of spatially and temporally integrating the wide variety of soils, land use and topographic characteristics that influence the hydrologic response of large watershed basins. The resultant model will have many empirical components, but it will have a mechanistic structure and fundamental basis.

Models such as the spatially variable hillslope model of Freeze, previously discussed, and the work of Smith and Hebbert (1979) are extremely helpful in providing examples of the influence of spatial variability on hydrologic response. By using models such as this in a simulation mode, either through the use of Monte Carlo experiments or analytically (Eagleson, 1978) derived, it is possible to determine the hydrologic response in probabilistic terms. For example, Eagleson uses a derived distribution of rainfall probability (amount and time) as the driving mechanism for a fully dynamic model that includes infiltration, exfiltration, transpiration, percolation to groundwater, and capillary rise to derive probability distributions of various independent water balance elements: surface runoff, evapotranspiration, and groundwater.

The effects of spatial variability on hydrologic response, see Freeze (1982) and Smith and Hebbert (1979), are dramatic enough that their effects should be incorporated into decision makers models; probably in the form of probability statements of input or response. This suggests that additional work similar to that of Freeze, Eagleson, and Smith and Hebbert is needed. It will, of course, require a significant commitment in both time and resources to develop. Almost all input values to the models previously described, i.e. slope, channel roughness, flow cross sectional shape, extent of plant canopy cover, climatic parameters, soils etc. exist in the form of probability distribution--in both time and space for some parameters. Analyses, based on observed measures of these distributions, are needed to determine their significance. This will require a significant commitment to field data collection and sampling.

5.5 MODEL EVALUATION AND TIME-SPACE TRADE-OFF

"Clearly, models and data are twinned components of the modeling procedure. Model assessment implies a concomitant assessment of data availability and worth. Certain models may have no predictive value unless certain data are available. Certain data may have great value as input to one model and no value at all as input to another" (Freeze, 1982).

With this introduction to the problem of the worth of data, I would like to discuss the concept of time-space tradeoffs and comparison of models. Assume that we have two models capable of predicting hydrologic response. For ease in presenting the concept assume that both are event type models, but one is a regression model that relates surface runoff to rainfall intensity and amount, antecedent soil moisture, extent of canopy cover, and infiltration rate which is assumed to be a function of tillage and time of the year. The other model is a simple conceptual model in which the catchment is divided into 3 regions that drain either into the channel or cascade across another to reach the channel. Infiltration is expressed by the Green and Ampt equation with parameters that differ for each of the three areas and also vary as a function of tillage. ET is calculated by the Penman equation and seepage beyond the root zone is expressed as a function of soil moisture content. We will divide the period of record into two parts, a calibration period in which parameter values will be determined and a verification period. The following evaluation will be performed on the verification period only. The error or residual variance, F^2 , of predicted and observed values is calculated for both models (see Freeze, 1982) as:

$$F^2 = \sum (q' - q)^2 \quad (1)$$

in which q and q' are the observed and computed volumes of surface runoff. The initial variance, F_o^2 , of the volumes of surface runoff is defined as:

$$F_o^2 = \sum (q - \bar{q})^2 \quad (2)$$

in which \bar{q} is the mean of the observed q 's. The efficiency of the model is defined in terms of the proportion of the initial variance accounted for by the model as:

$$R^2 = \frac{F_o^2 - F^2}{F_o^2} \quad (3)$$

The efficiency as defined by Eq (3) will be a minimum when the model is explaining much of the initial variance. The efficiency term, R^2 , can be used to compare performance of the two models. It is possible to use the same concept to look at how well models simulate individual events. Individual hydrographs are compared by letting the q 's in Eq. (1-3) be the consecutive observations of the hydrograph, and determining the R^2 value for each of the methods being compared. It is also possible to use the efficiency term to look at the stability of the model. In this case the efficiency, R^2 , is evaluated for both the calibration and the verification periods. In most cases the efficiency of the verification period is not as good as that of the calibration period. However, if the efficiency of the verification period is considerably less than that of the calibration period then the model may be unstable.

There are two ways that a modeler can improve model efficiency by minimizing R^2 ; one is by increasing the number of events, i.e. extending the length of the data set. The other is by increasing the spatial accuracy of the model. This is best illustrated by considering the mechanistic model that described the watershed as composed of three sub areas. Freeze (1982) and Smith and Hebbert (1979) show how accuracy of prediction can be improved by increasing the density of measurement points in the catchment. Thus instead of increasing the period of observation, we may be able to improve efficiency more by dividing the catchment into more subareas. The cost of obtaining a better index of the soil variability (i.e. conductivity and related data) may be considerably less than maintaining the record for a longer period of time. This is one example of a space-time tradeoff. The concept of a space-time tradeoff can also be applied to a network of gages where overall performance of a model can be improved introducing more gages is applying it to more watershed sites rather than waiting for a longer period of record.

Model Optimization

This section of the report is not a general discussion of optimization, but a description of a type of optimization that should be of benefit to hydrologists in the next few years.

Most researchers working on hydrologic models concentrate their efforts to improve model performance in analyzing the response of one quantity; surface runoff, or evapotranspiration rate, or infiltration rate, or groundwater flow, etc. Very frequently performance of the entire model is based on how well the model predicts surface runoff volumes, peaks etc. The larger more complex models are made up of submodels whose outputs, or fluxes, have been evaluated or optimized independently. Sensitivity analyses and testing of complete models very rarely considers an optimal evaluation of how all the submodels interact. It may be that overall performance of the model could be improved by an optimization of the entire model. Fiering (1982) describes a robust method of optimization that considers five concurrent elements: surface runoff, surface detention, plant storage, vadose zone storage and groundwater storage. Continuity equations are defined for each of the four storage elements. Fluxes into and out of each of the storages, values of state variables, and constraints on all parameters are identified. Even though the continuity equations are deterministic, a random disturbance term is added to respond to spatial heterogeneity, noise in measurement processes, and misspecification of state variables and fluxes. Parameters of the four storage continuity equations, the runoff, and the random term are obtained by constrained least squares or one of several other optimization techniques. The principal advantage of the method is that parameter values are constrained by observations of runoff and the four main storage compartments in the model rather than only one. In effect this increases considerably the number of observations that are available to fit the data. The result is a set of parameters that are less likely to be unique to the data set. It is also possible to improve the robustness of the model by imposing tighter constraints on parameters whose values are known to lie within specified ranges. This approach to model optimization is now under development, but should have considerable value as more causal models are developed in the next few years.

CONCLUSIONS

The development of research watersheds must be accompanied by an analytical description of the hydrologic processes being investigated. These descriptions could be as simple as empirical regression equations or as complex as detailed casual models. However, they should have their roots in the needs of the decision maker. The research may be fundamental in

character, but it must respond to some gap in knowledge needed to improve the decision makers ability to make decisions based on adequate information.

In the past decade it has become obvious that human influence on the hydrologic cycle has become so significant that we must look critically at both the temporal and spatial scale of our hydrologic modeling activity. Extensive use of the hydrosphere for storage, detoxification, waste assimilation, energy production, agricultural development and urbanization have shifted emphasis in hydrologic research to the need to study long-term and global effects. These effects impact the health and well-being of much of the worlds population, thus they set the stage for the need to develop new and improved procedures that are going to require increasingly precise and accurate predictive statements.

The need to respond to these types of problems requires that we concentrate on the development of causal models. Obviously, the decision maker, and those providing the information upon which his decisions are to be based, cannot afford to work with complex, data intensive models. His tools are going to have to be a combination of empirical and causal models. However, the empirical models must have a realistic structure that will enable them to be used in the wide variety of locations and situations with which the decision maker is forced to deal. These arguments stress the need for continued emphasis on causal model development.

The highest priority needs in the development of these models are considered to be (1) improved ability to deal effectively with problems of temporal and spatial scale, (2) better understanding of the coupling of chemistry and biology, (3) a better understanding of the effect of toxic substances on the food chain, (4) improved techniques to provide statistically stable parameter estimates, (5) continued emphasis in development of causal chains of hydrologic understanding, (6) development of more responsive statistical tools, (7) development of improved algorithms to deal with hydrologic extremes. These high priority needs should permeate our thinking at the time that we are developing analytical models to guide our watershed research programs.

Because of the large quantity of literature available that describe recent hydrologic model development, I have not discussed them, but instead I concentrated on the synergism between model development and field data collection. This was illustrated by using very brief descriptions of hypothetical models. The descriptions also illustrate how the model structure

impacts data collection. Causal type models, designed to improve our understanding of the physical processes, require considerably more field data and site description than do conventional empirical models that treat watershed processes as a "black box". Information such as soil conductivity, soil roughness, tillage, canopy cover, solar energy, wind, relative humidity, soil particle characteristics, etc. are frequently needed. As both field research and model development progress there is an obvious need for additional information; however it may be possible to reduce the collection of data in one area to support increased effort in another.

Model development that parallels field data collection aids in studying a research site by providing insight into the physical processes. Errors in predicting watershed response can frequently be traced to a lack of field definition, misinterpretation of parameter values, or an erroneous description of the physical processes. Thus the interaction between modeling and field data collection is very important to both efforts and to the selection of appropriate field instrumentation.

Hydrologic models also provide valuable assistance in assessing the accuracy required of the instrumentation or if sensitivity of the instrumentation is known, variance in model performance can be obtained. A sensitivity analysis of the model with respect to variables and parameters provides the information needed for this assessment.

Spatial and temporal variability are now handled by carrying-out hydrologic analyses on a short-time interval and segmenting the watershed site into "homogeneous" areas. This approach is not entirely satisfactory because in many cases it does not adequately represent the true effects of spatial variability. A few models have been developed to demonstrate the significant impact that spatial variability can have on hydrologic response, however, they require too much information to be of use to the decision maker. Continued effort is needed in this area to enable us to place probability estimates on parameter values. The decision maker needs this information on hydrologic variability to properly assess risk.

Another benefit of concurrent model and watershed development is the assessment of alternative model performance. By calculating residual or error variance in the prediction of an observed record, and thus the efficiency of model performance, it is possible to compare alternative models and also assess the value of additional data. Given this information one

can determine the cost of this data and thus assess its worth. The efficiency of model performance can also be used to look at the significance of alternative ways of improving performance, i.e. increasing the length of the observation period or increasing the number of observational points within the watershed. The use of additional spatial information instead of extending the record is a space for time tradeoff that can be extremely helpful to hydrologic model and watershed development.

A discussion of hydrologic model optimization is also presented. It consists of using all the major water storage reservoirs: the vadose zone, groundwater, surface detention, and plant storage in addition to runoff to determine optimal parameter values. The method takes advantage of the fact that parameter values are constrained by all five components, thus the model is based on an effectively larger data set. The net effect should be a more robust model.

REFERENCES

- (1) American Geophysical Union, 1983. Contributions in Hydrology - U.S. National Report 1979-1982 to the Eighteenth General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics Hamberg, Federal Republic of Germany, pp. 697-776.
- (2) American Geophysical Union, 1979, Papers in Hydrology - U.S. National Report 1975-1978 to the Seventeenth General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Canberra, Australia, pp. 1165-1351.
- (3) Coleman, Gerald and Donn G. DeCoursey, 1976, Sensitivity and model variance analysis applied to some evaporation and evapotranspiration models. Water Resources Res. Vol. 12, No. 5: pp. 873-879.
- (4) DeCoursey, D. G., 1982, ARS's Small Watershed Model, Paper No. 82-2094 Presented at 1982 Summer Meeting ASAE, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, June 27-30, 33 pp.
- (5) Dunne, Thomas, 1982, Models of Runoff Processes and Their Significance, in Scientific Basis of Water-Resources Management, Studies in Geophysics by the National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., pp. 17-30.
- (6) Eagleson, Peter S., 1978, Climate, Soil and Vegetation, 1. Introduction to Water Balance Dynamics, Water Resources Research, Vol. 14, No. 5, pp. 705-776.
- (7) Fiering, Myron B. and George Kuczero, 1982, Robust Estimators in Hydrology, in Scientific Basis of Water-Resources Management, Studies in Geophysics, by the National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., pp. 85-94.
- (8) Freeze, R. Allan, 1982, The Influence of Hillslope Hydrological Processes on the Stochastic Properties of Streamflow, In Statistical Analysis of Rainfall and Runoff, ed. V. P. Singh, Water Resources Publications, pp. 155-172.
- (9) Haan, C. T., H. P. Johnson, and D. L. Brakensiek, editors, 1982, Hydrologic Modeling of Small Watersheds, American Society of Agricultural Engineers, Monograph No. 5, Amer. Soc. of Agr. Engrs., St. Joseph, Missouri, 533 pp.
- (10) Hewlett, J. D., 1981, Models in land use hydrology: The need for closing the gap between theory and practice, keynote address at Workshop on the effect of rural land use and catchment management on water resources, Dept. of Water Affairs, Forestry and Environmental Conservation, Pretoria, South Africa, 13 pp.

- (11) Klemes, Vit, 1982, Empirical and Causal Models in Hydrology, in Scientific Basis of Water-Resources Management, Studies in Geophysics, by the National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., pp. 95-104.
- (12) Knisel, Walter G., editor, 1980, CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion for Agricultural Management Systems, U.S. Department of Agriculture, Conservation Report No. 26, 640 pp., illus.
- (13) Leopold, Luna B., 1982, Field Data: The Interface Between Hydrology and Geomorphology, in Scientific Basis of Water-Resources Management, Studies in Geophysics, by the National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., pp. 105-108.
- (14) Matalas, Nicholas C., Jurate M. Landwehr, and M. Gordon Walmon, 1982, Prediction in Water Management, in Scientific Basis of Water-Resources Management, Studies in Geophysics, by the National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., pp. 118-127.
- (15) National Research Council, 1982, Scientific Basis of the Water-Resource Management, Studies in Geophysics, National Academy Press, Washington, D.C., 127 pp.
- (16) Office of Technology Assessment, 1982, Use of Models for Water Resources Management, Planning, and Policy. Summary, Six Chapters and Appendix, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- (17) Saxton, K. E., 1975, Sensitivity analyses of the combination evapotranspiration equation, Agr. Meteorol. Vol. 15, pp. 343-353.
- (18) Shaffer, M. J. and W. E. Larson, Editors, 1982, NTRM Model (Nitrogen-Tillage-Residue-Management Model) Technical Documentation, USDA-ARS, St. Paul, Minnesota.
- (19) Singh, V. P., editor, 1982a, Statistical Analysis of Rainfall and Runoff, Proc. Int. Symp. on Rainfall-Runoff Modeling, Mississippi State, Mississippi, Water Resources Publications, 700 pp.
- (20) Singh, V. P., editor, 1982b, Modeling Components of Hydrologic Cycle, Proc. Int. Symp. on Rainfall-Runoff Modeling, Mississippi State, Mississippi, Water Resources Publications, 590 pp.
- (21) Singh, V. P., editor, 1982c, Rainfall-Runoff Relationship, Proc. Int. Symp. on Rainfall-Runoff Modeling, Mississippi State, Mississippi, Water Resources Publications, 582 pp.
- (22) Singh, V. P., editor, 1982d, Applied Modeling in Catchment Hydrology, Proc. Int. Symp. on Rainfall-Runoff Modeling, Mississippi State, Mississippi Water Resources Publications, 563 pp.
- (23) Smith, R. E. and R. H. B. Hebbert, 1979, A Monte Carlo Analysis of the Hydrologic Effects of Spatial Variability of Infiltration, Water Resources Research, Vol. 15, No. 2, pp. 419-429.
- (24) Vischer, D. and C. Emmenegger, Organizers, 1982, International Symposium on Hydrological Research Basins and Their Use in Water Resources Planning, Landeshydrologie-Postfach 2742, CH.-3001, Berne, Switzerland, 3 Vol.
- (25) Williams, J. R., P. T. Dyke, and C. A. Jones, 1983, EPIC - A Model for Assessing the Effects of Erosion and Soil Productivity, Proc. Third International Conference on State-of-the-Art in Ecological Modeling, Colorado State University, Fort Collins, May 24-28, 1982, 20 pp.
- (26) Wright, J. R., editor, 1983, SPUR - Simulation of Production and Utilization of Rangelands: A Rangeland Model for Management and Research, USDA-ARS Miscellaneous Publication No. 1431, 120 pp.
- (27) _____, 1982, Hydrological Research Basins and Their Use in Water Resources Planning, Volumes 1-3, Proc. Int. Symp. Bern, Switzerland.

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Colaboración Bilateral Uruguay-Estados Unidos

TRANSFER OF EXPERIMENTAL WATERSHED RESULTS TO RIVER BASINS

Roger P. Betson

Montevideo-Uruguay

Tennessee Valley Authority
Office of Natural Resources
Division of Air and Water Resources
Water Systems Development Branch

TRANSFER OF EXPERIMENTAL WATERSHED RESULTS TO RIVER BASINS

Roger P. Betson
Norris, Tennessee 37828 USA

Prepared for a
Research-Oriented Workshop on Experimental Watersheds
Montevideo, Uruguay
November 7-11, 1983

CONTENTS

	<u>Page</u>
Abstract	ii
1.0 Introduction	341
1.1 Two Early TVA Examples	342
1.2 Is It Possible to Transfer Findings?	343
1.3 Types of Information Which Might Be Transferred	344
2.0 The Problems of Transferring Results	344
2.1 The Problem of Scale	344
2.2 The Problem of Spatial Variability	349
3.0 The Techniques of Transfer	352
3.1 Why Are There No Standard Methods?	352
3.2 Index Areas	353
3.3 Regression Techniques	354
3.4 Empirical/Deterministic Equations	358
3.5 Hydrologic Models	363
3.6 Evaluation of Various Transfer Approaches	365
4.0 The Decision to Transfer	367
4.1 Model Acceptance in Decision Making	367
4.2 Finding the Universal Model	368
4.3 Simplistic vs. Complex Models	369
4.4 Some Transfer Failures and Successes	370
4.5 The Basin-Scale Approach	373
5.0 Needed Research	375
6.0 References	377

ABSTRACT

The transfer of results from experimental watersheds (~ 400 ha) to larger watersheds is usually the goal of an experimental watershed study. Whether the study is undertaken to demonstrate the hydrologic implications of land use modifications or to develop an improved understanding of hydrologic processes, there is either an implicit or explicit goal that the findings will be transferrable to larger watersheds or river basins (~ 400 km²).

Four general approaches, representing various levels of complexity and sophistication, have been used for transferring information from experimental watersheds. These approaches range from the use of index areas, to regression equations, to empirical/deterministic equations, and finally to hydrologic models. Each approach has advantages under certain circumstances and some disadvantages, which are discussed. The most versatile method of the four would appear to be the hydrologic model; yet there are problems in using this approach as well.

The transfer process is made complicated by problems which result from differences in scale, resulting in spatial and temporal variabilities. As the scale changes from micro to mesoscale, the relative importance of the hydrologic processes which dominate change, the level of data available decreases, the influence of land-use changes is reduced, and the decisions being made are different. In addition, there is considerably more variation in precipitation/climate, geology, soils, land use, etc. As a consequence, any attempt to transfer the findings to larger basins involves compromises.

Transfer of Experimental Watershed Results to River Basins

Roger P. Betson, Tennessee Valley Authority

P.O. Drawer E, Norris, TN 37828, USA

1. INTRODUCTION

Experimental watersheds have been defined in a number of ways. They have been defined as (1) basins where one or more of the catchment characteristics is deliberately modified (Toebe and Ouryvaev, 1970); (2) any small catchment instrumented for study of hydrologic phenomena and investigation of the principles, relationships, and prediction methods (American Geophysical Union, 1965); and (3) as benchmarks from which to measure long-term changes in hydrologic response resulting from climatic changes (WMO, 1965), from manmade changes (Leopold, 1962), or from watershed management effects in U.S. Forest Service Watersheds (Dortingnac and Beattie, 1965). Representative watersheds, in contrast, are defined as catchments which contain within their boundaries complex land forms, geology, land use, and vegetation representative of other catchments of similar, or larger, size within the region and will experience a minimum of natural or artificial change (Australian Water Resources Council, 1969).

Regardless of whether the basin is considered "representative" or "experimental" the usual purpose in instrumenting these catchments is to obtain information which can be transferred to other, usually larger basins. This transfer process may involve (1) the direct extrapolation of hydrologic response (e.g., index watersheds) or the effects of land-use changes or other modifications upon the hydrologic response; (2) the development of improved models which can be applied on larger basins; or (3) the development of methodologies for predicting the hydrologic response at ungaged sites. Small basins are typically selected because there is less variation to consider (rainfall, geology, land cover, soils, etc.); therefore, cause and effect relationship are more evident, and it is usually easier to control conditions (e.g., changes in land use) on smaller basins than larger basins. However, as will be shown, this transfer process can be complicated; there are no "standardized methods," and success is not assured.

1.1 TWO EARLY TVA EXAMPLES

The need to transfer results from the experimental watershed to larger areas and some of the difficulties in doing so can be illustrated through two early studies conducted by the Tennessee Valley Authority (TVA).

In 1953, TVA, in cooperation with the University of North Carolina, began a 10-year study in the Parker Branch Watershed located in the intermountain plateau region of western North Carolina (near Asheville, North Carolina). The purpose of the study was to determine the extent to which farm income could be raised, document the associated changes in farming operations, and determine the resulting changes in watershed hydrology. At the onset of the program, farming in the 429 ha watershed was on a subsistence-level, many farmers had off-farm jobs, and erosion was severe. Reorganization plans were developed for each farm which could optimize farm income. It was found (TVA-NCSC, 1963) that real farm income could be increased (four-fold), farmers made more productive (1/6 the effort to produce \$100 income) and improvements made to watershed hydrology. Because of land reclamation and a shift from cultivated land to pasture or alfalfa, flood peak discharges decreased, storm runoff decreased, sediment transport decreased, yet there was an increase in water yield. Obviously, if increased farm income and improved hydrology could be achieved on larger watersheds the benefits to people of the region might justify regional-scale projects. Unfortunately, at the time (1963) there was no way to quantitatively transfer the hydrologic results to even nearby larger watersheds because there was no way to account for major differences in rainfall, land use, and topography.

The second TVA experimental watershed study had as one of its goals the development of procedures for transferring the findings to larger basins (TVA-NCSU, 1970). Four small (1.5 to 2.3 ha) watersheds were instrumented to quantify the differences in streamflow associated with four agricultural covers. On three of the watersheds, 0.02 ha surface runoff subplots were instrumented to obtain data which, it was hoped, could be related to the corresponding storm runoff data collected on the entire watershed and thus establish relationships which could be used to transfer the findings to still larger basins. Unfortunately, it was found that storm runoff seldom occurred in the subplots yet frequently occurred in the study watersheds. Ultimately, it was concluded that the subplots were located on

soils with deep permeable A-horizons where storm runoff seldom occurred but storm runoff did originate elsewhere in the basins from areas with thin A-horizons and a swampy area created by a cutoff wall under the measuring flume. These findings were some of the early indications that partial watershed area runoff was an important phenomena (Betson, 1964) and certainly one that probably should be considered in transferring the results from experimental watersheds. Needless to say, no methods for transferring the results from this early experiment to larger basins were devised.

1.2 IS IT POSSIBLE TO CONFIDENTLY TRANSFER FINDINGS?

The lack of success in transferring the results from the two TVA experimental watersheds and similar transfer problems which occurred at other earlier study watersheds led researchers to question the value of the experimental watershed (for example, Slivitzky and Hendler, 1965; Ackerman, 1966; and Reynolds and Layton, 1967). In addition to the problem of transferring results, they were concerned about their cost, the fact that total runoff may not be measured because of leakage, are unrepresentative, and integrated effects tend to conceal processes. While these criticisms were largely refuted by Hewlett, et al. (1969), they do reinforce the fact that the findings from experimental watersheds must be interpreted carefully. More recently Pilgrim, et al. (1982), questioned the feasibility of transferring the results from small research watersheds to much larger basins on the grounds that no simple or closely defined relationships are likely to exist because of dissimilarities in their characteristics. This issue will be examined further in later sections.

There are, nevertheless, methods which have been used to varying degrees of success for transferring the results from experimental watersheds to larger basins. They range from straight extrapolation using index or representative subbasins to the use of mathematical hydrologic models. These various techniques are discussed in Chapter 3. Which technique might be applicable in a given situation depends to a large degree upon the size of the watersheds involved, the differences in the basin characteristics which must be considered, and the nature of the findings to be transferred. These considerations are all discussed in the next chapter.

As will be described in Chapter 3, a variety of techniques have been used to transfer the findings from experimental watershed (microscale)

to river basin (mesoscale). In this context, the macroscale refers to continental scale and is not relevant to this paper.

1.3 TYPES OF INFORMATION WHICH MIGHT BE TRANSFERRED

As will be described in Chapter 3, a considerable range of information, data, and findings have been transferred from the micro- to the mesoscale. There are no "standardized" techniques and the researcher is limited only by imagination, data, money, and possibly computer capability. Transfers have been made of flow components including peak flooding, water yield, low flow, as well as continuous flow simulations, sediment transport, water quality, and geomorphology. Perhaps the largest constraint in transferring the results from the micro- to mesoscale lies not in the technology of transfer, but rather in being realistic about the accuracies to be attained and in having these results accepted by decision makers particularly where land use change decisions are involved. These issues will be discussed in Chapter 4.

2.0 THE PROBLEMS OF TRANSFERRING RESULTS

The data collected at experimental watersheds are often obtained to quantify the hydrologic effects of land use change. Seldom can these results be extrapolated to larger basins directly because: (1) significant differences in precipitation, basin characteristics, and even climate may occur; (2) the effects do not scale directly; and (3) in larger basins, adjustments between process and form can modify the effects. The following sections describe some of these problems to provide caveats for Chapter 3 which describes transfer techniques.

2.1 THE PROBLEM OF SCALE

The Relationship Between Basin Size and the Hydrologic Processes Which Dominate

At the experimental watershed (micro) scale, ~ 400 ha, the hydrologic processes which effectively dominate and their relationships to basin characteristics are different than at the basin or mesoscale (~ 400 km²). At the microscale, as Chorley (1978) points out, not only are the classic components of hydrologic cycle (interception, evaporation, depression storage, infiltration, etc.) important but equally so are localized varia-

tions within the watershed as epitomized in the partial-area runoff concept (Hewlett, 1961; Betson, 1964). Hawkins (1982) and Weisman (1982) both address the effect of contributing areas on variations in the loss rate (infiltration) within the watershed and the latter paper emphasizes the importance of considering dynamic variations in the contributing area. Knapp (1978) discussed the importance of the redistribution of infiltrated water on the basis of land-form and how this affects the partial-area runoff process. In addition, the effect of low permeability impeding layers within the soil can become an important factor affecting storm runoff and the storm hydrograph (Whipkey and Kirkby, 1978). And finally, macro-pore flow, or piping, is thought to be an important process in conveying storm water down slope even in the absence of "overland flow" (Gregory and Walling, 1973).

While these latter processes are important to understanding how an experimental watershed responds to precipitation and the relationship between land-use changes and streamflow responses, they are no longer important considerations at the mesoscale basin. The reason is threefold. (1) As the basin size increases, averaging or smoothing begins to mask the effect of variations important at the microscale (for example, the effect of flood hydrograph attenuation over large distances will mask the effect of variations in contributing areas). (2) In river basins, the basin characteristics data are always sparse, and even if the same detail of data were available as at the microscale, managing these data would become a major problem. (3) Other factors, such as variations in precipitation/climate and major changes in geology/geomorphology across the basin, along with inadequately measured storm rainfall, can cause variations in the hydrologic response within the basin that become much more significant than the variations caused by many of the processes studied at the experimental watershed scale.

The Relationship Between Basin Size and the Decision to be Made

While there is a relationship between the types of decisions to be made at the meso- and microscale watersheds, the decisions to be made are usually quite different. Experimental watersheds involve both observations to better understand underlying processes and deliberate experimental procedures to introduce change and measure their effects (Boughton, 1968). Thus an experimental watershed might, for example, be used to study

processes of partial-area runoff, soil moisture recharge, or canopy interception; or the effects of land use changes such as forest cutting or urbanization on water yield or erosion rates. Basically, studies at this scale are to better understand (quantify) cause and effect relationships. The purpose is to use this knowledge to better predict response on larger basins. However, at the mesoscale the types of problems and decisions to be made are usually quite different. Here, the typical problem involves, for example, planning for reservoirs or their operation, flood control measures, reservoir sedimentation, etc.

Perhaps the difference in the types of problems addressed at these two scales and how they relate can be visualized through the types of investigation underway related to the effects of acid rain. This is a subject of concern world-wide as evidenced by a recent publication listing 3197 references concerning acid rain research (DOE, 1983). Experimental watersheds are used in acid rainfall investigations to study changes in the chemistry of rainfall as it passes through the vegetative cover and drains overland, through soil macro-pores, from storm runoff contributing areas within a watershed, and as baseflow. The purpose in these investigations is to develop sufficient understanding to isolate the significant processes. Once this is done, simplified models which incorporate features to handle these processes can be developed to predict the extent to which lakes or reservoirs (at the mesoscale) could become impacted if the present situation were allowed to continue vs. what might be achieved if control technologies (on acid emissions) were implemented. Thus, while the decision at the mesoscale (or possibly macroscale in this case) seemingly does not necessitate the level of detail or information required for studies at the experimental watershed scale, it is studies of the microscale which must provide the understanding necessary to develop appropriate models which can predict the implication of actions which affect the larger basins.

Data Available at the Micro- vs. the Mesoscale

While the actual physical and climatic data collected in conjunction with an investigation at the experimental watershed scale varies somewhat according to the nature of the study, the following information is usually obtained in some detail (Gregory and Walling, 1973, Chapters 2 and 3):

1. Topographic characteristics
2. Soils, geology, and sediment characteristics
3. Vegetation characteristics
4. Land-use
5. Rainfall and snowfall
6. Climatological data
7. Soil moisture
8. Streamflow

Seldom are these data available at the mesoscale at a level of detail even approaching that for the experimental watershed. For example, in a typical situation data maps (i.e., soils, topographic, geologic, etc.) available at the basin scale are either coarse or unavailable for many areas. In addition, while the raingage density may exceed one gage per km^2 at the microscale, the density is often less than one gage per 1000 km^2 at the river basin scale. As a consequence, the lack of data and definition of the physical/climatic characteristics at the mesoscale complicates the transfer process since either estimates or approximations must be made or very simple transfer methods used. In addition, at the river basin scale there usually is a very limited number of streamgage sites with data adequate to validate transfer methodologies. As a result of these data inadequacies, the credibility of transfer predictions suffer.

Time at the Micro- vs. Mesoscale

It is important to recognize that time is an important consideration at the two scales from two viewpoints (1) response time on an event basis; and (2) changes that take place over time.

The more obvious difference in time scale at the micro- vs. mesoscales involves the measurement of events such as storm runoff or solute concentrations. At the experimental watershed scale these events must be measured in terms of minutes or hours because of the variability which can occur over short periods. Thus models applied at this scale typically operate at time scales less than one hour. At the basin-scale, response time is considerably delayed; consequently, a time scale of one day or more may be adequate for characterizing response variations from event to event. This difference in time scale needed at the two drainage area scales has

implications in the design of raingauge networks (for example) and in how time is considered in the method used to transfer information from the experimental watershed to the basin.

Time is also a consideration in measuring the effects of drainage basin changes. Studies at experimental watersheds are often short-term, lasting less than 10 years although some have lasted much longer (e.g., Hibbert, 1966). These studies typically are aimed at investigating the effects of land use changes (mining, urbanization, deforestation, etc.) or altering soil character (fertilizing, drainage, etc.). Direct effects on flooding, water yield, baseflow, solute transport, etc., can be observed and related to the watershed modifications. Indirect changes to a catchment may also occur from these treatments including drainage network and channel changes, although these usually are not evident during short-term studies and they are seldom investigated. One exception was a study by Wolman (1967) in which he compared bankfull width of urban streams with those of non-urban channels and found the former to be much wider, presumably because of the increased runoff from urban areas.

Whereas modifications resulting from human intervention produce hydrologic changes noticeable on the short-term, more fundamental changes will also result on the longer term, and particularly at the mesoscale. Lane (1955) proposed an equation of equilibrium which related bedload and sediment particle diameter to water discharge and stream slope. In effect, this relationship indicates that a change in any one of these four variables will result in a corresponding change in one or more of the other variables until equilibrium is again reached. For example, increases in sediment loadings will decrease channel slopes downstream, as would a decrease in water discharge. This process is termed feedback and it is important to realize that these equilibrium changes usually occur over much longer periods of time than are considered in studies conducted on experimental watersheds.

Modifying Land-Use at the Micro- vs. Mesoscale

There is perhaps one last consideration involving decision making and the watershed/basin scale which does need to be addressed. Experimental watersheds are often selected because they either have a single land-use or because all (or most) of the land cover can be changed; thus the relation-

ship between land cover/use and hydrologic response can be easily quantified. At the mesoscale land use is complex and seldom can large-scale changes be realized. As a consequence, the detailed quantitative information obtained from the experimental watershed study is not directly applicable at the basin scale. The experimental watershed results, however, do, in a qualitative sense, serve to demonstrate the benefits of proposed land use modifications (e.g., the value of erosion control measures in reducing sediment loads) whether or not quantitative predictions are made for the river basin.

2.2 THE PROBLEM OF SPATIAL VARIABILITY

Process Interrelationships

Drainage area has been characterized by Anderson (1957) as the "devil's own variable" because almost every watershed characteristic is related with drainage area. It is beyond the scope of this paper to describe the association among basin characteristics as they are related to drainage basin characteristics. A detailed development can be found in Gregory and Walling (1973). These interrelationships are, however, significant to the process of transferring information from the experimental basin. Drainage basin attributes (length, shape, slope, drainage density, etc.) channel patterns (slope, length, shape), channel cross section, and slope characteristics (relief, composition, etc.) have all been related to drainage basin size. As the drainage basin increases in size, the variability in these attributes decreases (e.g., basin slope); hence, the measures become less sensitive. Thus the process of relating hydrologic response to particular sets of characteristics at the microscale level so that the implications can be transferred to larger basins becomes complicated because these characteristics will change as drainage area increases; hence, not only will the hydrologic response will change but the relationships will become less sensitive. This will occur whether or not man-induced changes are "imposed" on the system. Understanding these relationships among basin characteristics is necessary to the successful transfer of information.

Relationship of Hydrologic Response to Basin Characteristics

The relationship between drainage basin characteristics and the influence of water and sediment yields was formulated by Horton (1932, 1945). A variety of indices have been developed for relating water and sediment yield to climatic and basin characteristics and the reader is referred to Gregory and Walling (1973, Chapter 5) for more detail. The relationships developed among stream discharge, channel dimensions, and sediment discharge are perhaps the easiest to present and visualize. As originally presented by Leopold and Maddock (1953), the equations are of the form:

$$Y = a Q^b \quad \text{Eq. 2.2-1}$$

where: Y = a dependent variable
Q = stream discharge
a and b = coefficients.

Relationships with discharge in the form of this equation have been developed using channel depth and width, stream velocity, and sediment concentration as the dependent variables, Y. Although other factors also affect these relationships (channel roughness, slope, bed material size, etc.), essentially these relationships show that any changes in the flow regime brought about by man-induced changes to a watershed will result in changes to sediment loads and channel morphology (and other geomorphic properties) since basin form and the hydrologic processes are inexorably linked (i.e., the feedback process). Unfortunately, although all drainage basin characteristics may affect all aspects of process, the significance of the characteristic varies according to the process involved and the size of drainage area involved; consequently, these relationships are not easily predicted prior to development of regionalized relationships.

Variations in Basin Characteristics

Experimental watersheds are typically selected to minimize the number of variables which must be considered. Thus these study areas typically are underlain by a single rock type, have relatively uniform rainfall distribution, and have a single land-use. Mesoscale basins, on the other hand, may be located in more than one physiographic province, have pronounced rainfall gradients and even climatic variations across the basin,

and will usually have a variety of land uses. Under these circumstances the quantitative findings from experimental basins cannot be transferred without accounting for these additional sources of variability. Walling (1971) in a study of small watersheds in England identified basin characteristics which influence attributes of streamflow.

Dominant Characteristics Influencing Streamflow

(after Walling, 1971)

<u>Streamflow Attribute</u>	<u>Dominant Characteristics Which Influence</u>
Water Balance	
a. Annual runoff	Topographic aspect, vegetation
b. Monthly runoff	Rock type, vegetation
Flood Duration Curves	
a. Variability	Rock type, vegetation
b. Minimum levels	Rock type, vegetation, soil
c. Maximum levels	Rock type, topography, soil
Runoff Components	
a. Component values	Rock type, vegetation, soil
b. Runoff ratio	Rock type, vegetation, soil
c. Stormflow duration curves	Rock type, aspect
Rainfall/runoff relations	
a. Streamflow volume	Dynamic characteristics*, rock type, soil, vegetation
b. Hydrograph rise	Dynamic characteristics*, topography, soil
Hydrograph shape	Dynamic characteristics*

*Dynamic characteristics refer to rainfall and the way varying portions the watershed (partial contributing areas) influence streamflow.

Although the relative importance of the characteristics shown in the above table may differ for other climates, this table serves to illustrate that the hydrologic response of a drainage basin is not simply represented by lumped parameter systems (characteristics averaged across a watershed). Rather, larger basins are composed of a number of individual response units each possessing peculiar characteristics and contributing to the streamflow regime according to those characteristics, its location in the watershed, antecedent conditions and so on.

3.0 THE TECHNIQUES OF TRANSFER

3.1 WHY ARE THERE NO STANDARD METHODS?

There are essentially two reasons why there are no standardized methods for transferring the results from experimental watersheds to river basins. (1) The needs of decision makers vary, necessitating a variety of approaches. This reason is fairly obvious, was discussed in Section 2.1, and will be explored further in Section 4.1. (2) The transfer process is very complex. As a consequence, a variety of approaches have been attempted. Perhaps the reason why no standard methods exist can best be visualized through the parallel that exists with the reason there are so many hydrologic models. Betson and Ardis (1978) identified the following three reasons why there are so many models.

(1) One of the fundamental reasons why so many hydrologic models have been developed involves advancing technology. Prior to the development of electronic computers, uncomplicated methodologies were required; hence, many simplifying assumptions had to be made. It was not until the early 1960s that the true complexity of watershed runoff became generally appreciated, and potentially could be fully treated mathematically. We are still learning how these processes operate and developing improved methodologies for incorporating them into models.

(2) Despite improved formulations, models are still "nature imitating." The typical heterogeneity in soils, for example even on a hillslope, introduces so much variability that exact process (physically based) modeling becomes impractical even were it possible to exactly model the movement of water. "Therefore in the solution of practical problems, some idealization of the physical system and of the input must be made" (Nash, 1967). These simplifications mean that the model can only imitate nature. As a consequence, many different formulations based upon differing perceptions of what is important can be "justified" by their developers. Similarly, many transfer techniques can also be justified.

(3) The development of a hydrologic model (or transfer methodology) involves a compromise between those processes and detail the modeler would like to incorporate and those for which data can be obtained and which can reasonably be expected to be controlled in applying the model. "Generally, the simpler a model is, the easier it is to use, and probably the cheaper it is to use" (Dawdy, 1969). Essentially, there is a trade-off

that must be reckoned with in the development of a model (or transfer methodology). Presumably, as the formulation becomes more complete, or exact, the predictions will improve. Weighed against this fact is the realization that as the formulation becomes more complete more information and data will also be needed (and the ease of use decrease). Thus each developer must reach some practical compromise between user acceptability and the completeness of the formulations. These compromises result in many different models aimed at different user groups.

In summary, because the same types of trade-offs in degree of representation and amount of data to include are involved in the development of transfer techniques as are involved in model development it should not be surprising why there are no standard transfer methods. The following sections in this chapter will describe approaches which have been used.

3.2 INDEX AREAS

The index area approach assumes that provided the experimental watershed is "representative" the results obtained from any studies conducted should be indicative of what could be expected on larger areas. Obviously an index area transfer will be more qualitative than quantitative. However, as will be discussed in the next chapter, for many applications qualitative transfers may be sufficient for decision-making. For example, extrapolating the reductions in sediment transport resulting from erosion control measures as quantified at representative experimental watershed(s) to larger areas based on a percentage change may be adequate to justify instituting these measures. Quantification of the reduction which might occur on the river basin using one of the more elaborate techniques for transfer which are described subsequently, may add little to the decision making process or the political realities. Although, in the first TVA example (Parker Branch Watershed) described in Section 1.1, it was concluded that there was no way to quantitatively transfer the results from this experimental watershed to other larger areas, in retrospect, it is not obvious at this point how, if quantitative transfer methodologies had been available, these predicted results would have helped promote similar land use changes on larger basins. In other words, prediction of the potential hydrologic changes which might have occurred had similar land use changes been implemented (to varying degrees) in larger basins, it appears would

have added little to the demonstration value of the experimental watershed study, per se.

The use of index areas or representative watersheds in applications such as reservoir management does serve to show that this approach can be used as a transfer methodology. TVA uses streamgage data from index watersheds (approaching the macroscale) in river forecasting to estimate runoff volumes as a storm occurs so that storage/spill decisions can be made at downstream reservoirs prior to arrival of the flood wave at the reservoir and during stormflow recession periods (Cooper, 1974). Data from index watersheds are also used in TVA to estimate the potential volume of ground water in storage which will run off in subsequent periods as part of forecasting to optimize power generation. Thus, the index watershed transfer approach, if applicable, should be considered in relation to the decisions to be on a river basin.

3.3 REGRESSION TECHNIQUES

Regression equations are usually derived by adjusting a linearized equation to independent variables and their respective dependent variable(s) using multiple regression analyses, (or principle component analysis techniques if the independent variables are not entirely "independent"). These approaches necessitate using data from a fairly large number of gaged watersheds to obtain sufficient variation in the independent variables thought to be important in causing variation in the dependent variable. Obviously, an exhaustive description of the range of regression equations which have been developed is beyond the scope of this paper; therefore, only a limited number of representative approaches or equations will be presented along with descriptions of some additional models and the appropriate references.

Flow Component Equations

Perhaps the simplest approach to transferring the results obtained at small watersheds to larger ones is that typified by the U.S. Geological Survey's technique for estimating peak flooding (USGS, 1972). Flood frequency information from gaged areas is related to the drainage area with an equation of the form:

$$Q_p = aA^b B^c C^d \dots \quad \text{Eq. 3.3-1}$$

where: Q_p = the flood discharge for a particular return period
 A, B, C = independent variables (i.e., drainage area, slope, rainfall, etc.)
 a, b, c, d = coefficients

Relationships have been developed for many states in the United States. In Tennessee, for example, individual relationships were developed for four physiographic province groupings and six flood recurrence intervals using only drainage area as an independent variable. Over a range of drainage areas from 1 to >2000 km² the standard error of estimate varied from 30 to 50 percent using this approach (Randolph and Gamble, 1976).

Other researchers have included additional independent variables into flood discharge prediction equations. Thomas and Benson (1970) found that the percent forest and average basin elevation were also important in predicting 50-year floods in the Central Valley in California; Nash and Shaw (1966) found that either mean annual rainfall or slope (in addition to DA) improved prediction of the mean annual flood in Great Britain; and Rodda (1969) found that both the mean annual maximum rainfall and drainage density were significant in predicting the mean annual flood. Finally, Anderson (1970) developed equations for predicting flood peak discharges for urban areas in the Washington, D.C., area for various recurrence intervals using as independent variables drainage area, length, slope, the percent imperviousness, and the type of drainage system.

Thomas and Benson (1970) developed equations for predicting low flow discharges (7-day, 2-year, and 20-year minimums) for the Potomac River Basin and the Central Valley in California. The significant independent variables included: drainage area, percent forest, precipitation or snow-pack measures, and several basin characteristics. Gregory and Walling (1973, p 311) provide a number of additional references.

Water Quality Relationships

The paper by Renard (1980) describes four relationships, applicable generally in the southwest United States, which have been developed for predicting sediment yield. Perhaps the best known of these equations is that developed for range lands in the western United States by

Flaxman (1972) who related average annual sediment yield to: a ratio of average annual precipitation to average temperature; watershed slope; and two measures of soil properties. The equation explained 91 percent of the variance in annual sediment production from 27 watersheds ranging in size from 31 to 140 km². Additional sediment yield prediction equations are described in Gregory and Walling (1973, p 315).

A two-step regression analysis approach was used by Betson and McMaster (1975) to develop an approach for predicting 15 mineral water-quality constituents. An equation of the form

$$\text{Conc} = a (Q/DA)^b \quad \text{Eq. 3.3-2}$$

where: Conc = the constituent concentration
 Q = the concurrent stream discharge
 DA = the drainage area
 a, b = coefficients

was adjusted to concentration-flow data obtained from 66 watersheds in the Tennessee Valley region ranging in size from 0.6 to 1980 km². Next equations for predicting the two coefficients were obtained by adjusting the following equation to the data.

$$a, b = N_1F + N_2C + N_3S + N_4I + N_5U \quad \text{Eq. 3.3-3}$$

where: N₁ ... N₅ are coefficients;
 F = the fraction of the watershed forested
 C = the drainage area fraction over carbonate rock
 S = the drainage area fraction over shale-sandstone rock
 I = the drainage area fraction over igneous rock
 U = the drainage area fraction over unconsolidated rock

In validation tests the TVA model was found to be able to predict within about 30 to 50 percent for most constituents.

Lystrom, et al. (1978), and Steele and Jennings (1972) used more conventional regression analyses for developing solute prediction equations for the Susquehanna River Basin in eastern United States and for Texas, respectively. For the Susquehanna Basin, water quality was related to a variety of climatic, geologic, soils, land use, topographic, and streamflow variables; while for the Texas study, annual mean water quality constituent measures were related to stream discharge or basin average rainfall.

Geomorphologic Relationships

Data from Minnesota, Iowa, Texas, and Oklahoma in the United States were used by Thompson (1964) in a regression equation to predict gully erosion. The average rate of gully advance was related to drainage area, slope of the approach channel, summation of the rainfall from rains <12.7 mm, and the clay content of the eroding soil profile. The equation explained 77 percent of the variance.

A two-step approach has also been used to develop prediction equations for channel geometry. The basic equations are of the form of Eq. 2.2-1 with channel width, depth, and velocity used as dependent variables. In this approach regression analysis is used to determine the coefficients for each streamgage within a river basin. In some studies the coefficients are then averaged for the basin (Section 3.4 will summarize the results obtained from a number of studies using this approach). In other studies, regression analyses are used to explain some of the variation in the coefficients within the basin. Stall and Yang (1970) used data from drainage areas ranging from 1 to 20,000 km² to develop equations for predicting the discharge and channel geometry as a function of flow frequency and drainage area. Their equations were of the form:

$$Y = e^{a*DA^b} * e^{-cF} \quad \text{Eq. 3.3-4}$$

where: Y = either discharge velocity, channel depth, width, or area corresponding with a particular flow frequency
 DA = the drainage area
 F = the flow frequency in percent of time
 a, b, c = coefficients
 e = natural logarithm base

And finally, Betson (1979) in a similar attempt to explain some of the within-basin variation in the width and area associated coefficients, analyzed data for 34 gaged watersheds ranging in size from 0.67 to 2470 km² in the Cumberland Plateau physiographic province of Kentucky. His equations for channel width, W, and area, A, were modified to the form:

$$W, A = a(Q/DA)^b \quad \text{Eq. 3.3-5}$$

The intercept coefficients were found to be functions of drainage area while the exponent term was either a constant (width equation) or related to channel slope (cross-section equation). Regeneration tests along with tests

on 12 watersheds on the Plateau but outside the derived region indicated that predicted results should approach "those obtained with ordinary field measurements."

3.4 EMPIRICAL/DETERMINISTIC EQUATIONS

Methodologies in this category include techniques which lie between multiple regression equations derived from the analysis of sets of data and the more formal hydrologic models. Many of these techniques are considered models by some. Occasionally, these equations, or features of them, are incorporated into models. These are techniques developed either prior to the advent of high-speed computers or in response to a need for easily predicting the effect of land use changes. They more clearly begin to illustrate how information obtained from experimental watersheds (and even small plots) can be scaled upward to river basin drainages than was evident in the two previously described approaches. A few of the better known techniques (at least in the United States) which can be scaled upward will be described to illustrate the range of these techniques, their advantages, and some limitations.

Flow Components

Perhaps one of the better known empirical techniques developed based upon data obtained from small watersheds is the United States Soil Conservation Service runoff procedure (SCS, 1972). Rallison and Miller (1982) describe the origins of the model and some of its limitations. The technique, developed in 1954, was the end product a major field investigation and the work of many earlier investigators. It was developed to provide a consistent basis for predicting runoff under varying land use and soil types by SCS personnel in small watershed programs. Because of its simplicity, however, its use has spread across the spectrum of hydrologic applications. If the initial abstraction (early losses to surface detention, interception, infiltration) is assumed to be $0.2S$, the basic equation for predicting storm runoff can be written as:

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \text{ for } P > 0.2S \quad \text{Eq. 3.4-1}$$

where: Q = storm runoff volume (inches)
 P = storm rainfall (inches)
 S = a parameter given by:

$$S = (1000/CN) - 10 \quad \text{Eq. 3.4-2}$$

where: CN is an empirical curve number

Curve numbers have been developed for a variety of land uses, and soils grouped according to their infiltration capabilities. Over 4000 soils have been classified into these groups. The technique and related necessary information is presented in a number of manuals and texts. One of the more recent is that by Barfield, et al. (1981).

Because the SCS-CN procedure is easily understood and simple to use, it has been widely applied, subject to adaptations (e.g., see SCS, 1975, for adaptations to handle urban areas) and the subject of many professional papers (i.e., see sessions devoted to curve number papers in recent meetings, Singh, 1982, and Borrelli, et al., 1983). The method has been incorporated into watershed models (e.g., SCS TR-20, SCS, 1969; SEDIMOT, Barfield, et al., 1980; and EPIC, Williams and Renard, 1983); which were developed to be used in watershed/urban planning, surface mining, and estimating the effect of erosion on soil productivity, respectively. Although these models are more properly applied on watersheds smaller than the river basin scale they illustrate a basic process for transferring a technique developed largely using microscale watershed data to larger areas.

While the SCS-CN approach illustrates how an empirical equation can be made useful by quantifying the "parameters" using data from microscale watersheds, the findings from experimental watersheds can also be used to develop empirical equations. One interesting approach was that used by Douglass and Swank (1972). They examined the first-year increase in runoff which resulted from cutting mixed deciduous hardwood forest stands on experimental watersheds located at four study sites in the United States Appalachian Highlands (from North Carolina to New Hampshire). Average precipitation on these watersheds varied from 930 to over 2000 mm annually. They found that the first year streamflow increase in mm (FYI) could be related to the percent reduction in forest stand basal area (X) with the following function:

$$FYI = -35.3 + 3.3(X) \quad \text{Eq. 3.4-3}$$

The increase in streamflow in subsequent years was found to decrease exponentially and could be predicted from the first year increase:

$$SYI = FYI - \frac{FYI}{\log(.0618FYI)} \log T \quad \text{Eq. 3.4-4}$$

where: SYI = Subsequent year increase (mm)
T = Time (in years) after treatment

Betson (1979) compared the results obtained from two experimental watersheds in coastal plain soils in northwestern Alabama with predictions using these equations and found the observed increases were somewhat higher than the predicted values; a fact attributed to the presence of pine stands. Equation 3.4-3 was incorporated as an algorithm to adjust evapotranspiration estimates in a watershed model developed by TVA (Betson, 1980).

Procedures similar to the above and other methods using the same basic approach are used in the northwestern United States (Galbraith, 1975) for timber sale planning and watershed management.

Water Quality

Probably one of the most widely known and used equations for estimating gross erosion from upland areas is the universal soil-loss equation, USLE (Wischmeier and Smith, 1978):

$$A = RKLSCP \quad \text{Eq. 3.4-5}$$

where: A = Estimated annual soil loss
R = Rainfall erosivity factor
K = Soil-erodibility factor
LS = Length-Slope factor
C = Cover-management factor
P = Conservation practices factor

Nomographs and tables for determining the factors in Eq. 3.4-5 at locations in the United States are available in many references (e.g., Barfield, et al., 1981).

The USLE is a product of 40 years of erosion research by the U.S. Department of Agriculture using erosion plots to identify the major factors and to determine the factor values for computing loss rates. When the method was checked against 2300 plot-years of soil loss data from 189 field

plots located across the United States, the average prediction error was 12 percent of the mean annual loss (USDA, 1981).

Two techniques have been used so that the equation could be applied to larger drainage basins. The first technique employs a sediment delivery ratio. Since the USLE estimates gross erosion (less deposition in erosion control devices via the "P" factor) a downward adjustment must be made to account for deposition along field boundaries, toes of slopes, and along stream channels and alluvial valleys. This adjustment can be made using a sediment delivery ratio which is commonly related to drainage area (Boyce, 1975). This relationship (to about 200 km²) can be approximated with:

$$SDR \approx 0.315 DA^{-0.2} \quad \text{Eq. 3.4-6}$$

where: SDR = the sediment delivery ratio; i.e., ratio of sediment delivered in the stream system to gross erosion from all upstream sources
DA = the drainage area, km²

Reports on the prediction accuracy when delivery ratios are used are contradictory and sparse. The approach is simplistic and probably its use justifiable only for gross approximations.

The second method devised for using equation 3.4-5 to predict sediment for larger drainages is the Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE, devised by Williams (1975). Williams replaced the rainfall energy term with a function of storm runoff times the storm peak discharge:

$$S = 11.78(V*Q_p)^{.56} KLSCP \quad \text{Eq. 3.4-6}$$

where: S = the storm sediment load in tonnes
V = storm runoff volume in m³
Q_p = storm peak discharge in m³/s

The modified equation eliminates the need for a delivery ratio because the same "watershed characteristics such as drainage area, stream slope, and watershed shape influence runoff rates and delivery ratios in the same manner" (Williams, 1975). The equation has been used to predict sediment yields for watersheds up to 2600 km² (Onstad, et al., 1977).

Geomorphic Relationships

The relationships between channel measures and discharge were introduced by Leopold and Maddock (1953). Their equations were of the form:

$$W = aQ^b \quad \text{Eq. 3.4-7}$$

$$D = cQ^f \quad \text{Eq. 3.4-8}$$

$$V = kQ^m \quad \text{Eq. 3.4-9}$$

where: Q = discharge

W , D , and V = width, depth, and velocity, respectively

The remaining letters are coefficients.

Because these channel measures are linked to discharge, they can be related together, as was shown by Leopold and Maddock (1953), such that:

$$b + f + m = 1.0 \quad \text{Eq. 3.4-10}$$

$$a \cdot c \cdot k = 1.0 \quad \text{Eq. 3.4-11}$$

As explained in Section 3.3, the coefficients are usually determined at a stream gaging station by adjusting the equation to instantaneous discharge vs. width, depth, and velocity data. The following table summarizes the average exponent values obtained in a number of studies.

Typical Station Exponent Terms

Location of Basins	Exponents			Reference
	Width b	Depth f	Velocity m	
Mid- and West U.S.	0.26	0.40	0.34	Leopold and Maddock (1953)
158 Sta. in U.S.	0.12	0.45	0.43	Leopold, et al. (1954)
Semi-arid U.S.	0.29	0.36	0.34	Leopold, et al. (1954)
10 Sta. Rhine R.	0.13	0.41	0.43	Leopold, et al. (1954)
12 Sta. across U.S.	0.21	0.39	0.39	Stall and Yang (1970)
Theoretical	0.23	0.42	0.35	Leopold and Langbein (1962)

Although the exponent terms for individual gaging stations within basins vary more than is indicated by the data in the above table, this example illustrates a technique for comparing stream channel geometry from one area to another and for transferring information to larger basins. In the study by Stall and Yang (1970), for example, the 12 river basins ranged in size from 3,968 to 21,800 km² but within these basins many of the gaging stations used had drainage areas less than 300 km².

3.5 HYDROLOGIC MODELS

While the previous three methods have been used to transfer the results from experimental (and larger) watersheds to large basins, the most obvious way to do so is through hydrologic models. Since the inception of the electronic computer the development of hydrologic, or watershed, models have tended to evolve from assemblages of empirical techniques developed in the precomputer era to increasingly more deterministic, or at least realistic formulations. In general, as more about individual processes in the hydrologic cycle such as interception, evapotranspiration, soil moisture distribution, overland flow routing, etc., is learned at the experimental watersheds, algorithms or components incorporating these features have begun to appear in the hydrologic models. However, as was explained in Section 3.1 and will be explained further in Section 4.2, it is not necessarily desirable nor has it always been found feasible to incorporate all of the information and findings obtained at experimental watersheds into hydrologic models.

It is beyond the scope of this paper to summarize or attempt to review the hydrologic models available. There are simply too many. A number of survey papers have been published in recent years which cover a wide variety of the models and processes available (for example, Grimsrud, et al., 1976; U.S. Forest Service, 1977; Renard, et al., 1978; Knisel, 1980; OTA, 1982; and Haan, et al., 1982). The text by Haan, et al. (1982) is a good reference which describes the modeling process in general and methods used to model components of the hydrologic cycle. Rather than attempt to summarize their material the remaining portions of this section will describe how models are typically applied and the confidence that might be placed in some of the results.

The Calibration-Application Approach

There are essentially two approaches for applying hydrologic models: (1) calibration and application and (2) applying a regionalized/deterministic model. (This latter approach will be described in the next section.) Calibration involves adjusting the model to watershed data by modifying the model parameters so that the model results reasonably match recorded data. This can be accomplished by successive adjustments of the model's parameters or by using an objective parameter optimization

procedure. Usually, some of the model parameters can be determined from direct measurement (e.g., drainage area, impervious area, channel slope, etc.) which limits the number of parameters to be estimated.

Once a model is adequately calibrated, so that the output reasonably emulates recorded data, the outcome needs to be evaluated to determine if the results are adequate. First, the parameter values should be consistent with typical values obtained elsewhere or with any analogous watershed characteristics. Next, the results should be verified by comparing predictions for another period with observed data (if available) since there may have been errors in the data used in model calibration. Haan, et al. (1982, p 446 ff), discuss these issues in model calibration at some length.

Calibrated hydrologic models have bridged the gap from the experimental watershed to applications approaching (and infrequently including) the mesoscale. Haan, et al. (1982, p 479 ff), describe a considerable range of applications that have been made by various investigators.

Regionalized/Deterministic Hydrologic Models

At locations where the recorded hydrologic data necessary for calibrating a model are unavailable, a regionalized or deterministic (physically based) model must be used. As an example, the SCS curve number procedures described in Section 3.4 have been incorporated into a model by the SCS (1969) for which all model parameters can be estimated from basin and climate data. Another approach has been to calibrate a watershed model at a number of locations within a region and then develop relationships among the optimized model parameters and appropriate basin characteristics. In application, then, the model parameters are predicted using these relationships and the model can, therefore, be applied at locations where calibration data are unavailable. One example of a regionalized model is that developed by TVA (Betson, et al., 1980). The model survey in Haan, et al. (1982, ch. 13), includes a number of models which do not require calibration.

Validation is almost a prerequisite when using this type of model particularly if it is applied on larger watersheds. There are too many opportunities for improper or incorrect application of models to have any confidence in the results when they are applied in the absence of site data

unless the user is an experienced practitioner or some validation is performed. When these models are applied at sites where streamflow data are unavailable, validation could consist of applying the model at one or more "comparable" sites where recorded data are available, or comparing the model output with the results obtained from regression techniques (Section 3.3) or other studies.

3.6 EVALUATION OF THE VARIOUS TRANSFER APPROACHES

Index Areas

The index area approach is limited as a transfer methodology. It can be used in a situation where conditions in the experimental watershed and the river basin are similar (land use, topography, geology, climate, precipitation) and/or in a situation where reliable quantitative predictions are not needed. In this latter case, generalizations to the river basin scale based upon unit yields (e.g., discharge or loads/sq km) or a percent change to be expected may be adequate. This approach may be justified, for example, when large changes have been found as a result of land-use adjustments on the experimental watershed but there is no way to forecast whether these land-use changes might be realized on the river basin due to an inability to adequately promote or enforce the land use changes.

Regression Techniques

The regression approach is not a feasible transfer method unless there are a relatively large number of experimental watersheds available. One advantage of the regression technique, however, is that data from other gaged watersheds can be combined with that from experimental watersheds. The technique is simple and the equations relatively easy to use. Generally, regression equations are used either when the underlying mechanisms are not well understood (precluding more rigorous formulations) or relatively simple prediction techniques are needed.

The regression equations are usually not widely used because their applicability outside of the basin or region in which they were derived is seldom known. These techniques often do not allow for the effective prediction of land use change effects either because land-use is not a variable or is introduced indirectly (i.e., percent forest). And finally, as anyone who has used regression techniques knows, there are many caveats

to be observed when using the technique and extrapolation is risky because the coefficients may have little physical meaning. Consequently, the technique must be used with caution.

Empirical/Deterministic Equations

This approach can provide techniques which become popular because of their simplicity and ease of use. The equations such as the SCS curve number method and the universal soil loss equation were developed over many years, utilizing large data bases. Following their inception it was necessary to determine the appropriate parametric measures for thousands of soils. Thus these methods can be expensive and time-consuming to develop. These equations are not always applicable at the mesoscale. More important, these techniques are not easily modified as additional insight into hydrologic processes are obtained from experimental watersheds. Because of their popularity these techniques are usually studied and evaluated extensively. As a consequence, many changes and improvements are proposed and some do find general acceptance (i.e., Williams' modification to the universal soil loss equation). Because these equations are popular and easy to use, they are often incorporated as algorithms or components in hydrologic models which can be applied on larger watersheds.

Hydrologic Models

Hydrologic process models represent the most feasible way to transfer the findings from experimental watersheds to larger basins. As relationships are quantified and processes better understood, appropriate features can be incorporated into hydrologic models. Hydrologic models, however, are relatively expensive to use, may require input data (basin measures, climatic data) not easily obtained or unavailable, and in the absence of streamflow data at the site for validation may not provide reliable results. Moreover, as will be explained in the next chapter, improved results are not always assured as a model becomes more complex. Thus, while hydrologic models have the best potential for transferring results from experimental watersheds to larger basins, the process can be complicated. And finally, while some of the more detailed hydrologic models have been frequently applied at watersheds approaching the mesoscale, for reasons explained in Chapter 2 (and the following chapter), they have not seen wide application on large river basins.

4.0 THE DECISION TO TRANSFER

The previous sections have explored some of the problems involved in transferring results from watersheds at the microscale to those at the mesoscale and some of the techniques which have been used. However, it is not axiomatic that this transfer process is always necessary, or at times, even desirable. This section will explore some of the problems which can result when this transfer process leads to increasingly complex models, and some of the current approaches to mesoscale modeling that are being considered.

4.1 MODEL ACCEPTANCE IN DECISION MAKING

The findings from experimental watersheds are transferred to larger basins basically to improve decisions. However, there are major constraints which are essential elements in the decision maker's acceptance of modeling technology.

The following factors which affect model acceptance are adapted from a Holcomb Research Institute (1976) report on modeling and decision making.

- a. Limited resources. Decision makers are all faced with the problem of limited resources; therefore, the ability of the modeler to compete with alternate techniques for limited resources may dictate how complex a model it may be practical to use.
- b. Political pressures. Decision makers, particularly those involved in policy formulation, are typically subject to pressures from conflicting political groups. As a consequence, political decisions may be made which are contrary to the evidence derived from modeling. Modeling may also be employed to support a decision made prior to model use; occupy staff time to justify investments in computer equipment; or advance an image of using up-to-date techniques in decision making. Obviously, state-of-the-art models may not always be justified under these circumstances.
- c. Problem complexity. Decision makers face very complex problems almost daily. Solutions, when they are effected, often create unmanageable additional problems. Consequently, decision makers tend to accept simpler models which they can understand or have general acceptance.

- d. Unfamiliarity with modeling. A decision maker's acceptance of models can be affected by unfamiliarity with, misunderstanding of, or lack of confidence in the modeling tool. The decision maker may be unclear about how the model results might help and reluctant to trust the results.
- f. Disparity between decision maker's needs and model output. Modelers often have professional motivations which lead them to concentrate on advancing the state-of-the-art. Rewards are usually given on the basis of professional contributions rather than for developing models that have utility for decision makers. Ideally a model should be selected or developed based upon interaction between the modeler and the decision maker. Seldom is this possible. As a consequence, models are sometimes used which have output not always relevant to decision making.

In summary, a realistic review of the decisions to be made and a pragmatic assessment of the decision maker and his constraints may often justify the use of rather simplistic approaches to transferring the results obtained from experimental watersheds. In view of the difficulties involved in transferring results, this situation is not necessarily undesirable.

4.2 FINDING THE UNIVERSAL MODEL

"Engineers and water planners see the careful representation of hydrologic processes necessary for hydrologic modeling as promising better estimates of hydrologic quantities for management decisions. Those who attempt to model, however, soon find that the physical laws that govern these water movements and storages are so complex that the parameters that must be measured for their representation are so variable in space and time that construction of a reliable model is no easy matter. ... At the present time, hydrologic science still falls short of a universal model that can be recommended for all user applications and a user must consider alternatives in deciding how to best model for a given application" (Haan, et al., 1982).

As explained in Section 3.1, as model formulations improve, the amount of information needed to drive the model, particularly for large watershed applications, increases to account for spatial and temporal variations. As a consequence, the cost and difficulty of applying the model must

also increase. It is probable that if a universal model were to be developed which could handle very complex problems at the river basin scale (e.g., quantifying the fate of acid rain on the terrestrial ecosystem and the resulting effect on streamflow quality and quantity), the model would be prohibitively expensive to use for more conventional applications such as predicting flooding. Nor would superior results be assured if the complex model were used for simpler problems, as will be discussed next.

4.3 SIMPLISTIC VS. COMPLEX MODELS

Few studies have been conducted which compare the results obtained using hydrologic models of similar complexity. Such comparisons are expensive and it is usually difficult to be completely objective in estimating model parameter values to assure fair comparisons. Even fewer studies have been conducted to determine whether complex models necessarily produce results superior to those which might be obtained using much simpler formulations. Consequently, it is difficult to document that increased model complexity does not necessarily lead to improved results. Intuitively, more complex models become increasingly difficult to use; hence there is increased opportunity for errors and misapplications to go undetected and affect the results. But two recent papers do provide some insight into this problem of complex vs. simple models.

Engman, et al. (1981), investigated the premise that additional information about the spatial distribution of information on a 10.8 ha watershed located in Oklahoma (USA) would improve predictions obtained with the physically based distributed hydrologic model KINEROS (Smith, 1979). The area was chosen because of a very complete history of hydrologic data and 26 ring infiltrometer measurements. It was found that spatially distributing infiltration parameters by soil type or by data location did not improve the results. Average parameters estimated a priori from soil properties gave nearly as good results as were obtained using either optimized parameters derived from rainfall-runoff data, or the average of the 26 infiltrometer measurements. While these findings apply to an experimental watershed they do illustrate rather conclusively that additional information and detail does not necessarily lead to improved results. The implications extend to mesoscale modeling where, as described in Section 2.1, additional factors also can affect model results.

Naef (1981) in a series of tests on large river basins concluded that simple models can give satisfactory results; however, neither simple nor complex models were necessarily free from failure in certain cases because none of them adequately describe the rainfall-runoff process. In one test a model similar to the Stanford Watershed model used by the U.S. National Weather Service was adjusted to data from three large river basins (1440 km² to 130,000 km²) in a semi-arid, a humid, and a tropical climate. Approximately 20 parameters had to be determined for the hydrologic model. A simple three-parameter model was also calibrated to the three data sets. Both models were then used to predict a period used for verification with the measured discharges unknown to the model owners. The results obtained were mixed, with the simpler model providing better results during calibration on one of the basins and better or comparable results during validation at two of the basins. It would be difficult to decide, therefore, which of the two models is better suited to these basins. These and other studies led Naef (1981) to conclude that: (1) under average conditions, the simulation and forecasting of discharge are not difficult tasks; they can be solved using simple models and the selection of the model is not critical; and (2) forecasts under extraordinary conditions or extrapolations (using models he tested) are a matter of luck since none of them really reflect the runoff process and the data are not available in the required quality.

Although the conclusions from these two papers by themselves cannot prove that complex models do not always yield sufficiently superior results to justify their additional cost and effort, they, along with the problems discussed in Sections 2.1 and 2.2, indicate that transferring results from experimental watersheds to river basins via hydrologic models is a complicated process and success is by no means assured.

4.4 SOME TRANSFER FAILURES AND SUCCESSES

Although aimed at the larger issue of transferring water resource knowledge per se (as opposed to transferring the results from experimental watersheds), the publication describing a 1977 conference on Water Knowledge Transfer (Gregg, 1978) contains a number of papers describing constraints to knowledge transfer and some notable successes.

One difficulty in attempting to document transfer failures and successes is that the failures are usually not publicized while the

successes are widely published. If there has been one area of failure in transferring the results from experimental watersheds to river basins, it has been in attempts to discretize watersheds into homogeneous units or representative areas. One early attempt was the concept of unit source areas (Amerman, 1965). Unit source areas were defined as subdivisions of a watershed with a single cover soil type and otherwise homogeneous. These areas were to be instrumented and the response from the areas modeled. It was assumed that those factors affecting runoff would be isolated and evaluated so accurately that runoff could be predicted on any unit-source under a combination of factors. Hickock and Osborn (1969) visualized the unit source area approach as bridging the gap between the experimental plots and larger watershed systems. The unit-source area approach failed because, as Engman, et al. (1971), pointed out, small hydrologic systems are not linear components of large systems. In other words, even at the unit-source area scale, variations in soil depths and permeabilities, clay pans, slope position, etc., introduce enough variability so that seemingly similar unit source areas respond differently.

A somewhat similar approach but on a larger scale was undertaken by TVA in the mid-1960s (Betson, 1965). Data from 11 nested watersheds ranging in size from 0.54 to 370 km² were to be used to relate parameters in hydrologic models to corresponding cover/soil survey data measured at grid points within each watershed. The hope was that this approach could be used to identify the runoff source areas and thus provide a means for predicting flows at ungaged areas. It was concluded (TVA, 1973) that the most dense survey grid used (0.4 km) would not have been sufficient to identify source areas; moreover, detailed soils information would have had to have been measured at each grid intersection thereby making the technique, if it had worked, impractical to use.

More recently, Pilgrim (1982) in a review of the effects of watershed size on runoff relationships observed that while relationships exist between the hydrologic response in small and large catchments, no closely defined and simple relationships are likely. He concluded that while it is possible to develop relationships for transferring hydrological data from one catchment to another in a given region, the form of these relationships vary from region to region thus casting doubt on the concept of homogeneous regions and representative watersheds. These conclusions coupled with the

previous two studies cast doubt on any attempts to discretize small or large watersheds into components which can be handled as "representative units" based upon soils and cover.

Perhaps the easiest way to illustrate success in transferring experimental basin results to larger watersheds is through the evolution of hydrologic models. One of the first models developed was the Stanford Watershed Model (Crawford and Linsley, 1966) which was a lumped storage and process model and a coarse approximation to real hydrologic processes on watersheds (Frere, et al., 1982). The original Stanford model only had the capability for generating streamflow. The text by Haan, et al. (1982), documents (p 413) a number of sophisticated models which are now available for predicting both the quality and quantity of streamflow from urban, agricultural, and rural areas. Many of these models have concepts and algorithms which were tested or originated from experimental watershed studies.

Two applications of models at the mesoscale which have been made will be mentioned--both used in assessing the effects of coal mining on a larger river basin; one a lumped-parameter model, the other a distributed parameter model.

Tung (1975) investigated the impacts of contour mining of coal on the 989 km² New River Basin in Tennessee. He calibrated the TVA Continuous Daily Streamflow (Betson, et al., 1980) to each of four five-year periods selected between 1943 and 1974, during which mining increased from one percent to five percent of the watershed area. He then regenerated the entire 20-year period using each set of optimized model parameters. He next selected 36 storms of known rainfall return periods from the 20-year period and using a daily flow vs. maximum discharge relationship, derived for the 1943-47 base period, estimated the discharge that would occur based upon the daily flow simulated using the model calibrated to the other three periods. Using this approach he concluded that storm runoff increased as much as 18 percent as mining intensified.

Doyle, et al. (1983), evaluated the effects of surface coal mining on the 4040 km² Tug Fork Basin located in Kentucky, Virginia, and West Virginia, which by 1980 had been mined in some 5.5 percent of the area. They used the distributed parameter U.S. Geological Survey model PRMS. The basin was subdivided into 30 subwatersheds, or hydrologic response units

(HRU's) for which water balance and energy balance were computed daily. The sum of all HRU's weighted on a unit area basis produced the daily system response. These responses were then routed downstream. The model was calibrated for land use conditions in 1950 (baseline) and 1980 successively at 11 streamgaging stations starting upstream and proceeding downstream. Two 29-year synthetic daily streamflow sequences were then generated representing the two land use conditions and compared. Despite good adjustment of the model to observed data at the streamgage sites during calibration, the results of statistical analyses indicated no significant difference between model generated flows with the 1950 and 1980 conditions at any of 15 simulation sites within the basin. It was observed that possibly because of data errors, due primarily to nonrepresentative rainfall characteristics, "model noise" may have masked any changes to flood flows which may have resulted from mining.

4.5 THE BASIN-SCALE APPROACH

While there are procedures for transferring results from experimental watersheds to larger watersheds as described in earlier sections, the transfer to large river basins (>>,400 km²) has not been particularly successful. Indeed, Beven (1983) in a review of recent papers on hydrology questioned whether scientific hydrology has advanced to the point where predictions based upon physical theory are adequate at ungaged basins despite a plethora of "physically based" models. His rationale for this conclusion involves many of the same issues described earlier and can be summarized as: (1) a lack of knowledge of the runoff production processes (i.e., partial area runoff and the effects of macropores); (2) the spatial variability of model parameters; (3) the effect of measurement scale on our understanding of flow processes; (4) the change of basin structure with spatial scale; and (5) the non-stationarity of basin structure over long time scales.

For many basin-scale applications, it has been found necessary to develop methodologies specifically for the particular application. The reason why centers around the problems of coping with the problems of scale and spatial variabilities as described in Sections 2.1 and 2.2. In order to handle the data availability and management problems (i.e., basin characteristics, precipitation, soils, cover, etc.) as the basin becomes larger the

need to extrapolate from sparse measurements increases. Therefore, the representativeness of the data in terms of the needs of the model becomes inconsistent, which results in "noise." Intuitively, there is no reason to expect, nor is there any empirical evidence to indicate, that all those hydrologic processes which are important at the experimental watershed scale are also significant on the river basin scale. At the mesoscale a great many details get averaged out. Therefore, different approaches (i.e., models or other methodologies) can be justified for river basins which, in general, can be simpler than used for smaller areas.

These limitations on the upward transfer of results (via hydrologic models) from the micro- to mesoscale suggest the following for modeling large basins:

1. Use suitable simplified "conventional" models where adequate data are available for calibrating the model.
2. Develop new approaches for use at sites where calibration data are inadequate. These approaches should attempt to link hydrologic response to geomorphological variables and take advantage of the form-process relationships which must obtain on large basins.

An example of the latter approach is contained in the paper by Hebson and Wood (1982). Using the response functions developed by Rodriguez-Iturbe and Valdez (1979) and Gupta, et al. (1980), they developed flood frequency distributions from rainfall distributions and a geomorphologically derived unit hydrograph for two Appalachian Mountain watersheds of 105 km² and 992 km². The results showed good agreement with observed data. Similarly, Wang, et al. (1981), related the parameters of the response function to rainfall intensity and explained some of the non-linearity of runoff response in a physically realistic way. They found that the exponent on a function of mean travel time through the network varied with basin area. For very small basins the exponent value was consistent with earlier data obtained from runoff plots while for large basins, >3,200 km², the value was zero, and exhibited an expected linear variation between these values.

5.0 NEEDED RESEARCH

As should be apparent from reading this chapter there are a large number of methodologies which can be used in transferring information from experimental watersheds. These methodologies should be tested in other countries. In developing nations and other countries where hydrologic research has been limited, it would be far more cost-effective to evaluate existing methodologies, their advantages and their limitations, than to begin developing new methods. There is every reason to expect many that of the methodologies already developed will work in other nations. The macroscale (continental) relationships described in Gregory and Walling (1973), for example, illustrate rather clearly that hydrologic processes are not affected by political boundaries.

Research is needed to test suitable methodologies in other countries where at least climates are similar to that in the nation which developed the technique. There is a need to better define the continental limits of some of the more popular techniques. In order for a country to do this effectively, however, it will be necessary to make a realistic assessment of the decisions to be made, the decision making processes (Section 4.1), and the data which may be available for utilizing the methodologies which are to be tested. Probably the largest burden will be in obtaining an adequate budget and a sufficiently long-term commitment to obtain the topographic maps, the soils, geologic and land use information, and the precipitation and streamflow data (see Dawdy, 1979) needed to test these methodologies. If models are to be employed, the assessments of current modeling issues described in Appendix C of the OTA (1982) report are recommended reading.

Comparison testing of developed methodologies, particularly hydrologic models, needs to be done in developed nations where the hydrologic data, basin characteristic information, and climatologic data already exist in relative abundance. Models are seemingly being continuously developed; yet, there is little assurance that our ability to predict at ungaged sites is improving or that the complex formulations necessarily provide results superior to the more simplistic approaches. There is a need to identify a number of river basins with different climate and physiography where data are plentiful which could be used to test mesoscale prediction

techniques and transfer methodologies. If the physically based models are incapable of providing satisfactory results at the mesoscale, then realistic approaches for modeling river basins should be developed.

REFERENCES

- Ackermann, W. C., 1966. Guidelines for Research on Hydrology of Small Watersheds. U.S. Dept. Interior, O.W.R.R., Washington, D.C., USA, 26 pp.
- American Geophysical Union, 1965. Inventory of Representative and Experimental Watershed Studies Conducted in the United States. American Geophysical Union.
- Amerman, C. R., 1965. The Use of Unit Source Watershed Data for Runoff Prediction. Water Resources Research (1), pp. 499-507.
- Anderson, H. W., 1957. Relating Sediment Yield to Watershed Variables. Trans. Amer. Geop. Union, 38, pp. 921-924.
- Anderson, D. G., 1970. Effects of Urban Development on Floods in Northern Virginia. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2001-C, 26 pp.
- Australian Water Resources Council, 1969. Representative Basin Concept in Australia. Australian Water Resources Council Hydrologic Series 2.
- Barfield, B. J., L. G. Wells, B. Wilson, J. S. Tapp and R. A. Uhl, 1980. A Design Model for Sediment Control on Mined Lands. in Symposium on Watershed Management 1980, Boise, ID, Amer. Soc. Civil Engineers, New York, NY 10017, pp. 628-642.
- Barfield, B. J., R. C. Warner and C. T. Haan, 1981. Applied Hydrology and Sedimentology for Disturbed Lands. Oklahoma Technical Press, Stillwater, OK, 603 pp.
- Betson, R. P., 1964. What is Watershed Runoff? Jour. of Geop. Res. 69(8), pp. 1541-1551.
- _____, 1965. Upper Bear Creek Experimental Watershed Research in Hydrologic Analysis-Synthesis. Int. Assoc. Sci. Hyd., Pub. No. 66, Symposium of Budapest, pp. 178-184.
- _____, 1979. A Geomorphic Model for Use in Streamflow Routing. Water Resources Research Vol. 15(1), pp. 95-101.
- _____, 1979. The Effects of Clear Cutting Practices on Upper Bear Creek, Alabama, Watershed. Tennessee Valley Authority, Rept. WR28-1-550-101, P.O. Drawer E, Norris, TN 37828, 100 pp.
- Betson, R. P., and W. M. McMaster, 1975. Nonpoint Source Mineral Water Quality Model. J. Water Pollution Cont. Fed. V47, No. 10, pp. 2461-2473.
- Betson, R. P., and C. V. Ardis, 1978. Implications for Modeling Surface Water Hydrology. In Hillslope Hydrology (M. J. Kirkby, ed.) John Wiley & Sons, Ltd, New York, NY, pp. 295-323.

- Betson, R. P., J. Bales and H. E. Pratt, 1980. Users Guide to TVA-HYSIM -- A Hydrologic Program for Quantifying Land-Use Change Effects. EPA-600/7-80-048, Tennessee Valley Authority, P.O. Drawer E, Norris, TN 37801, 81 pp.
- Bevan, K., 1983. Surface Water Hydrology-Runoff Generation and Basin Structure. in Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol. 21, No. 3, U.S. National Report to the International Union of Geodesy and Geophysics 1979-1982, pp. 721-730.
- Borrelli, J., V. R. Hasfurther, and R. D. Burman (eds), 1983. Advances in Irrigation and Drainage: Surviving External Pressures. Proceeding of a Specialty Conference, Jackson, WY, ASCE, New York, NY, 558 pp.
- Boughton, W. C., 1968. Hydrologic Studies of Changes in Land Use. Soil and Water 4, pp. 19-23.
- Boyce, R. C., 1975. Sediment Routing with Delivery Ratios. In Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, Agricultural Research Service Pub. ARS-540 USDA Washington, D.C., pp. 61-65.
- Chorley, R. J., 1978. The Hillslope Hydrologic Cycle. in Hillslope Hydrology (M. J. Kirkby, ed.), John Wiley and Sons, Ltd., New York, NY, pp. 1-42.
- Cooper, A. J., 1974. Management of an Integrated Water Control System. Presented to the Conf. on the TVA Experience at the International Instit. for Applied Systems Analyses, Schloss Laxenburg, Austria.
- Crawford, N. H., and R. K. Linsley, 1966. Digital Simulation in Hydrology-Stanford Watershed Model IV. Stanford University Dept. of Civil Engr. Tech. Rept. No. 39, 1966.
- Dawdy, D. R., 1969. Considerations Involved in Evaluating Mathematical Modeling of Urban Hydrologic Systems. U.S. Geologic Survey Water Supply Paper 1591-D.
- _____, Dec. 1979. The Worth of Hydrologic Data. Water Resources Research Vol. 15, No. 6, pp. 1726-1732.
- Department of Energy, 1983. Acid Precipitation: A Bibliography. Technical Information Center, P.O. Box 62, Oak Ridge, TN 37830 USA, DOE/TIC 3399 (DE83008750).
- Dortingnac, E. J., and B. Beattie, 1965. Using Representative Watersheds to Manage Forest and Range Lands for Improved Water Yield. Inter. Assoc. Sci. Hyd. Pub. 66, pp. 480-480.
- Douglass, J. E., and W. T. Swank, 1972. Streamflow Modification Through Management of Eastern Forests. U.S. Forest Service Research Paper SE-94 Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC, USA, 15 pp.
- Doyle, W. H., P. B. Curwick, and K. M. Flynn, 1983. A Flood Model for the Tug Fork Basin, Kentucky, Virginia, and West Virginia. U.S. Geol. Survey, Water Resources Inv. Rept. 83-4014, Box 25425 Federal Center, Lakewood, CO 80225, 87 pp.
- Engman, E. T., W. J. Gburek, L. H. Parmele, and J. B. Urban, 1971. Scale Problems in Interdisciplinary Water Resources Investigations. Jour. Amer. Water Resources Assoc. Water Resources Bulletin, pp. 495-505.
- Engman, E. T., S-T. Chu, W. T. Rawls, and T. J. Jackson, 1981. Spatial Effects on Hydrologic Model Data Requirements. Proceedings Specialty Conf. Water Forum '81, ASCE, August 10-14, 1981, pp. 813-820.
- Flaxman, E. M., 1972. Predicting Sediment Yield in Western United States. Jour. of Hyd. Div. ASCE, V.98 N.12, pp. 2073-2085.
- Frere, M. H., E. H. Seely, and R. A. Leonard, 1982. Modeling the Quality of Water from Agricultural Land. in Hydrologic Modeling of Small Watersheds, Amer. Soc. Agricultural Engineers, 2950 Niles Road, P.O. Box 410, St. Joseph, MI 49085, pp. 383-405.
- Galbraith, A. F., 1975. Method for Predicting Increases in Water Yield Related to Timber Harvesting and Site Conditions. in Watershed Management, Proceedings of a Symposium in Logan, UT, Amer. Soc. of Civil Engineers, New York, NY, pp. 169-184.
- Gregg, N.S. (principal ed.), 1978. Water Knowledge Transfer (2 Vols.), Proc. of the Second Inter. Conf. on Transfer of Water Resources Knowledge, Water Resources Publications, P.O. Box 303, Ft. Collins, CO 80522, USA, 1107 pp.
- Gregory, K. J., and D. E. Walling, 1973. Drainage Basin Form and Processes: A Geomorphological Approach. Halsted Press, a division of John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 456 pp.
- Grimsrud, G. P., E. J. Finnemore, and H. J. Owen, 1976. Evaluation of Water Quality Models-A Management Guide for Planners. EPA Office of Air, Land, and Water Use, EPA-600/5-76-004, 176 pp.
- Gupta, V. K., E. C. Waymire, and C. T. Wang, 1980. A Representation of an Instantaneous Unit Hydrograph from Geomorphology. Water Resources Res., 16(5), pp. 855-862.
- Haan, C. T., H. P. Johnson, and D. L. Brakensiek(eds.), 1982. Hydrologic Modeling of Small Watersheds. an American Society of Agricultural Engineers Monograph No. 5, 2950 Niles Road, P.O. Box 410, St. Joseph, MI 49085, 533 pp.

- Hawkins, R. H., 1982. Interpretations of Source Area Variability in Rainfall-Runoff Relationships. in Rainfall-Runoff Relationship (V.P. Singh, ed.) Water Resources Publications, P.O. Box 2841, Littleton, Colorado, USA, pp. 303-324.
- Hebson, C., and E. R. Wood, 1982. A Derived Flood Frequency Distribution Using Horton Order Ratios. *Water Resources Res.* 18(5), pp. 1509-1518.
- Hewlett, J. D., 1961. Soil Moisture as a Source of Baseflow from Steep Mountain Watersheds. U.S. Dept. Agriculture Forest Serv. S.E. Forest Expt Sta. Paper 132.
- Hewlett, J. D., H. W. Lull, and K. G. Reinhart, 1969. In Defense of Experimental Watersheds. *Water Resources Research*, 5, pp. 306-316.
- Hibbert, A.R. 1966. Forest Treatment Effects on Water Yield. in W. E. Sopper and H. W. Lull (eds). *Inter. Symp. on Forest Hydrology*, Pergamon Press, pp. 527-543.
- Hickok, R. B., and H. B. Osborn, 1969. Some Limitations on Estimates of Infiltration as a Basis for Predicting Watershed Runoff. *Amer. Soc. of Agric. Engrs.* V. 12, pp. 738-803.
- Holcomb Research Institute, 1976. *Environmental Modeling and Decision Making--The United States Experience*, The Praeger Pub., New York, NY 152 pp.
- Horton, R. E., 1932. Drainage Basin Characteristics. *Trans. Amer. Geophys. Union* (13), pp. 350-361.
- Horton, R. E., 1945. Erosional Development of Streams and their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Geomorphology. *Geol. Soc. Amer. Bull* 56, pp. 275-370.
- Knapp, B. J., 1978. Infiltration and Storage of Soil Water. in *Hillslope Hydrology* (M. J. Kirkby, ed.), John Wiley and Sons, Ltd., New York, NY, pp. 43-72.
- Knisel, W. G., Jr., 1980. Erosion and Sediment Yield Models--An Overview. *ASCE Symposium on Watershed Management 1980*, Vol. 1, pp. 141-150.
- Lane, E. W., 1955. The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering. *Proc. ASCE J. Hyd. Div.* 81(745) pp. 1-17.
- Leopold, L. B., 1962. The Vigil Network. *International Assoc. of Sci. Hyd. Bull.* 7, pp. 5-9.
- Leopold, L. B., and T. Maddock, 1953. The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper* 252, 1953, 56 pp.
- Leopold, L. B., M. G. Wolman, and J. P. Miller, 1954. *Fluvial Processes in Geomorphology*. W. H. Freeman and Co. San Francisco, 522 pp.
- Leopold, L. B., and W. B. Langbein, 1962. The Concept of Entropy in Landscape Evolution, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 500-A, 20 pp.
- Lystrom, D. J., F. A. Rinella, D. A. Rickert, and L. Zimmerman, 1978. Multiple Regression Approach for Regional Water Quality Management. EPA-600/7-78-198, Environmental Research Laboratory, U.S.EPA, Athens, GA 30605, 59 pp.
- Naef, F., 1981. Can We Model the Rainfall-Runoff Process Today? *Inter. Assoc. of Hydrologic Sciences*, Blackwell Scientific Publications Ltd., Oxford England, 26(3), pp. 281-289.
- Nash, J. E., 1967. The Role of Parametric Hydrology. *Jour. of the Institute of Water Engineers* Vol. 21, pp. 435-474.
- Nash, J. E., and B. L. Shaw, 1966. Flood Frequency as a Function of Catchment Characteristics. in *River Flood Hydrology*, Institution of Civil Engineers, London, pp. 115-136.
- Office of Technology Assessment, 1982. *Use of Models for Water Resources Management, Planning, and Policy*. Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402, 242pp.
- Onstad, C. A., C. K. Mutchler, and A. J. Bowie, 1977. Predicting Sediment Yields. in *Soil Environment and Sedimentation*, Amer. Soc. Agricultural Engineers, 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085, pp. 43-58.
- Pilgrim, D. H., I. Cordery, and B. C. Baron, 1982. Effects of Catchment Size on Runoff Relationships. *J. Hydrology*, 58, pp. 205-221.
- Rallison, R. E., and N. Miller, 1982. Past, Present, and Future SCS Runoff Procedure. in Rainfall Runoff Relationship (V. P. Singh, ed.) Water Resources Publications, Littleton, CA, pp. 353-364.
- Randolph, W. J., and C. R. Gamble, 1976. Technique for Estimating Magnitude and Frequency of Floods in Tennessee. U.S. Geological Survey. A-413 Federal Building, Nashville, TN 37203, 52 pp.
- Renard, K. G., 1980. Estimating Erosion and Sediment Yield from Rangeland. in *Symposium on Watershed Management 1980*, Boise, ID, pub. by Amer. Soc. of Civil Engineers, New York, NY, pp. 164-175.
- Renard, K. G., W. J. Rawls, and M. M. Fopel, 1978. Currently Available Models. in *ASAE Monograph: Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, Amer. Soc. of Agricultural Engineers, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085.

Reynolds, E.R.C., and L. Leyton, 1967. Research Data on Forest Policy: The Purpose, Methods, and Progress of Forest Hydrology. Proc. 9th Brit. Commonwealth, Forestry Conf., Commonwealth Forestry Inst. Univ. of Oxford, 16 pp.

Rodda, J. C., 1969. The Significance of Basin Rainfall and Morphology in a Study of Floods in the United Kingdom. UNESCO Symposium on Floods and Their Compilation, Inter. Assoc. Sci. Hyd., UNESCO-W MO, Vol. 2, pp. 834-845.

Rodriguez-Iturbe, R., and J. B. Valdez, 1979. The Geomorphic Structure of Hydrologic Response. Water Resources Res., 15(6), pp. 1409-1420.

Singh, V. P. (ed.), 1982. Rainfall-Runoff Relationship. Proceeding of an International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling held at Mississippi State, MS. Water Resources Publications, Littleton, CO 80161, 582 pp.

Slivitzky, M. S., and M. Hendler, 1965. Watershed Research as a Basis for Water Resources Development. in Research Watersheds, Fourth Canadian Hyd. Symp., Canadian Nat. Reg. Council, pp. 289-294.

Smith, R. E., 1979. A Kinematic Model for Surface Mine Sediment Yield. ASAE Paper #79-253 Presented at Winter Meeting of American Society of Agr. Engrs., New Orleans, LA, Dec. 11-14, 1979.

Soil Conservation Service, 1969. Computer Program for Project Formulation Hydrology. Soil Conservation Service Tech. Release 20 (TR-20) Supplement No. 1 March 1969.

Soil Conservation Service, 1972. National Engineering Handbook. Section IV Hydrology, Part 1-Watershed Planning, Washington, D.C.

Soil Conservation Service, 1975. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release No. 55, U.S. Department of Agriculture.

Stall, J. B., and C. T. Yang, 1970. Hydraulic Geometry of 12 Selected Streams Systems of the United States. Univ. of Illinois Water Resources Research Confer. Rept. No. 32, Urbana, IL, 72 pp.

Steele, T. D., and M. E. Jennings, 1972. Regional Analysis of Streamflow Chemical Quality in Texas. Water Resources Res. 8(2), pp. 460-477.

Tennessee Valley Authority and North Carolina State College, 1963. Parker Branch Research Watershed-Project Report 1953-1962, Tennessee Valley Authority, Knoxville, TN, USA 101 pp.

Tennessee Valley Authority and North Carolina State University, 1970. Watershed Research in Western North Carolina, Tennessee Valley Authority, Knoxville, TN, USA, 115 pp.

Tennessee Valley Authority, 1973. Summary Report on the Upper Bear Creek Experimental Project. Knoxville, TN, 43 pp.

Thomas, D. M., and M. A. Benson, 1970. Generalization of Streamflow Characteristics from Drainage Basin Characteristics. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1975.

Thompson, J. R., 1964. Quantitative Effect of Watershed Variables on Rate of Gully-head Advancement. Trans. Amer. Agr. Engineers 7(1) pp. 54-55.

Toebe, C., and V. Ouryvaev (eds.), 1970. Representative and Experimental Basins. An International Guide for Research and Practice. UNESCO.

Tung, H., 1975. Impacts of Contour Coal Mining on Streamflow, A Case of the New River Watershed, TN. Ph.D. Dissertation, University of Tennessee, Knoxville, TN.

U.S. Department of Agriculture, 1981. Measurement and Prediction of Erosion and Sediment Yield. USDA Science and Education Administration, Agricultural Reviews and Manuals, ARM-S-15, P.O. Box 53326, New Orleans, LA 70153, 23 pp.

U.S. Forest Service, 1977. Nonpoint Water Quality, Modeling in Wildland Management: A State of the Art Assessment (Vol. 1--Text). USDA Forest Service, EPA Environmental Research Lab. Athens, Ga, EPA-600/3-77-036, 146 pp.

U.S. Geological Survey, 1972. Regional Analysis of Streamflow Characteristics. Tech. of Water-Resources Inv., Book 4 Ch. B3, 15 pp.

Walling, D. E., 1971. Streamflow from Instrumented Catchments in Southeast Devon. in K. J. Gregory and W. L. D. Ravenhill (eds.) Exeter Essays in Geography. Exeter, G. B.

Wang, C. T. and V. K. Gupta, 1981. A Geomorphic Synthesis of Nonlinearity in Surface Runoff. Water Resources Res. Vol. 17(3), pp. 545-554.

Weisman, R. N., 1982. Modeling Dynamic Source Areas. in Rainfall-Runoff Relationship (V.P. Singh, ed.). Water Resources Publications, P.O. Box 2841, Littleton, Colorado, USA, pp. 325-334.

Whipkey, R. Z. and M. J. Kirkby, 1978. Flow Within the Soil. in Hillslope Hydrology (M. J. Kirkby, ed.) John Wiley and Sons, Ltd., New York, NY pp. 121-144.

Williams, J. R., 1975. Sediment Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor. Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, Oxford, MS, U.S. Dept. of Agr. ARS-S-40, pp. 244-252.

Williams, J. R., and K. G. Renard, 1983. Experience with Curve Numbers in EPIC. in Proc. of the Specialty Conference on Advances in Irrigation and Drainage: Surviving External Pressures. Amer. Soc. Civil Engineers, New York, NY 10017, pp. 282-289.

Wischmeier, W. H., and D. D. Smith, 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses- A Guide to Conservation Planning. U.S. Dept. Agric. Handb. 537, 58 pp. (Avail. from USDA SEA Washington, D.C. 20250)

Wolman, M. G., 1967. Two Problems Involving River Channel Changes and Background Observations. in Quantitative Geography Part II Physical and Cartographic Topics. Northwestern University Studies in Geography 14, pp. 67-107.

World Meteorological Organization, 1965. Guide to Hydrometeorological Practices. WMO 168, TP 82.

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

HYDROLOGIC CHANGES DUE TO WATER RESOURCES DEVELOPMENT

Prof. Vujica Yevjevich

Montevideo-Uruguay

RESEARCH ORIENTED WORKSHOP ON EXPERIMENTAL WATERSHEDS
U.S. - Uruguay Bilateral Cooperation

HYDROLOGIC CHANGES DUE TO WATER RESOURCES DEVELOPMENT

by

Vujica Yevjevich
Director, International Water Resources Institute
George Washington University
Washington, D.C. 20052, U.S.A.

and

Professor of Civil Engineering
Colorado State University
Fort Collins, CO 80523, U.S.A.

Abstract

Man-made activities and disruptions in nature introduce changes in water supply series, and thus affect planning and operation of water systems of the future. Difficulties in identification and removal of generated trends and jumps in parameters are the general experience on the subject. To show the importance and the character of tendency in water supply time series, two cases are discussed in some detail: the case of the Nile River at Aswan and at Lake Victoria, and the case of the Colorado River at Lee Ferry Station in the United States.

Two approaches are discussed for the analysis and treatment of tendency in hydrologic series: whether it exists or not, and how to model it. General tendency models can be postulated and developed. The depletion approach to the analysis of changes in the mean water supplies, exemplified on the case of the Colorado River, is a practical way of treating the randomly varied depletions for tendency in annual hydrologic series.

Unremoved or overremoved tendencies in parameters have a significant impact on series properties. Two simple cases, the jump change in the mean and the linear trend in the mean, introduced into independent series, show the effects if the tendency is neglected and the non-homogeneous series is treated as homogeneous. A complex case of various changes in the series show that an independent series becomes highly time dependent if the tendency in parameters are ignored, and the series with changes considered as tendency-free.

General and specific approaches are discussed on how the problems of discrimination (identification) of changes should be treated, with a particular example of discrimination of effects of weather modification on precipitation

and runoff. Finally, the state-of-the-art of the classical technique of detecting the changes in the mean by the double-mass curve analysis is briefly reviewed.

1. PROBLEMS ARISING IN WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT

To best plan and operate water resources systems, the water supply and the water demand should be known as accurately as it would be economically feasible and/or justified. Their forecasts, predictions and projections are crucial for maximum benefits in management of these systems. Water resources systems are built to transform the time-space water supply distributions in such a way as to meet the time-space water demand variations. Therefore, the important group of problems involved becomes the estimation of changes in water quantity and water quality characteristics due to both, the man-made developments and the natural disruptions and evolutions. These changes may either be beneficial or detrimental to particular interests and purposes of water resources development, conservation, control and protection. They may lead to conflicts of interests and, therefore, require the institutional and technological means of resolving adversities in an optimal way.

Basically, the above changes occur as the time evolution in basic parameters of hydrologic time series, usually conceived as tendency in the form of trends and slippages in the mean, standard deviation, autocorrelation and the other time series parameters. The changes due to man's activities in river basins are conceived as an important part of the non-homogeneity (or non-stationarity) in time series, especially due to the fact that they very much affect the planning and operation of future water resources projects and systems.

2. IDENTIFICATION AND REMOVAL OF TENDENCY

The reliable identification and removal of tendency in parameters represent the least developed aspects of structural analysis and mathematical modeling of hydrologic time processes. They basically require a combination of three main groups of factors:

- (1) Identification of physically or historically based changes;
- (2) Availability of sufficient, reliable historical records and information on the causal factors of changes and the changes themselves in data and in river basins; and
- (3) Use of appropriate statistical techniques for inferring the types and times of occurrence of tendency changes in parameters, supported by the history of river basin changes and the history of observations of water supplies and water demands.

Inaccuracy of identification and removal of tendency in parameters from historical samples significantly affect the analysis of hydrologic time series. The reasons are:

(1) Difficulties of precisely locating in time the past changes in important parameters, and the corresponding effects on series after the trends or slippages are removed.

(2) Overestimation or underestimation of tendency represent carry-over effects into the further structural analysis, such as intermittency, periodicity and stochasticity of time series. It seems safe to state that the treatment of tendency properties of hydrologic time series is one of the most difficult hydrologic problems, with the least accurate results in their analysis. The following examples best illustrate this problem.

3. EXAMPLES OF NON-HOMOGENEITY

3.1 CASE OF THE NILE RIVER AT ASWAN AND AT LAKE VICTORIA

The case of the River Nile at Aswan Dam, Fig. 1, is given here as the

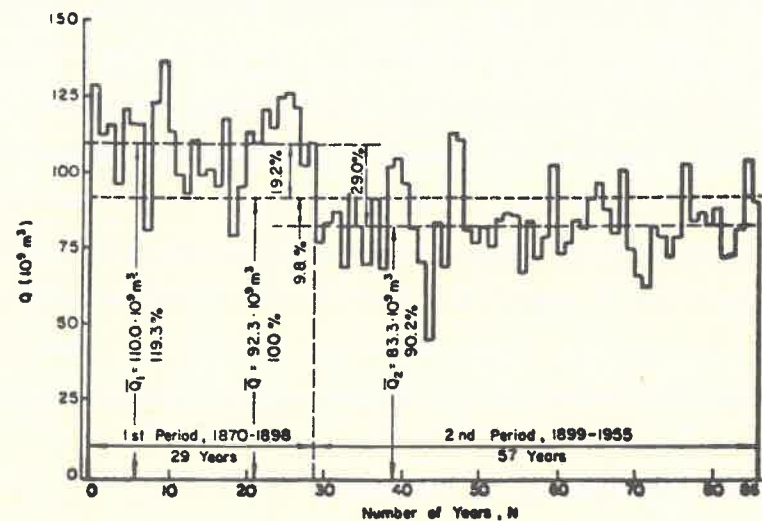


Fig. 1 Fluctuations of annual flow of the River Nile at Aswan as an example of inconsistency and non-homogeneity in data.

example of a combination of systematic errors and non-homogeneity (Yevjevich 1963). Before the construction of Aswan Dam (1903), observations were made only of river levels by using stage gauge downstream of the present dam site, with no regular discharge measurements. From 1903-1939, discharge stage rating curve was accurately determined by relating the dam sluice gate measurements to the stages downstream. This rating curve was then applied retroactively to determine discharges for the period 1869-1903.

When the dam construction started, and the coarse sediment of the Nile River retained, the removal of sediment islands and bank erosion downstream changed the rating curve that existed prior to construction. The results (Hurst et al. 1946) show that the mean discharge for the 34 years before 1903 (1869-1902) was $3380 \text{ m}^3/\text{s}$, or 1.15 in modular coefficient (Fig. 1). The mean

discharge for the 52 years after 1903 (1903-1955) was $2650 \text{ m}^3/\text{s}$, or 0.90 in modular coefficient (Fig. 1). Though the man-made reservoir increased the losses by evaporation and bank seepage, the difference in the mean flow of $730 \text{ m}^3/\text{s}$ between the two periods cannot be explained only in this manner. Four factors were likely combined to show a 25 percent difference in the means of the two periods:

(1) The natural stochastic variation likely was such that the 34-year period (1869-1902) was somewhat wetter than the 52-year period (1903-1955). The difference of the two means of 0.25 in modular coefficients has only a 0.01 percent chance to be produced by the natural stochastic fluctuation. For the series divided into the 29-year (1869-1898) and 57-year periods (1899-1955), this difference is still greater, and the probability of its occurrence would be smaller than 0.01 percent.

(2) Systematic errors were introduced into data by the use of a rating curve which was produced after 1903 but applied to river stages observed prior to 1903.

(3) Non-homogeneity in data was produced by the reservoir in the form of increased evaporation and bank percolation.

(4) Non-homogeneity in data may have also been produced by an increase in upstream water consumption, therefore, by evaporation, irrigation and reservoirs.

A hypothesis is tempting, namely the existence of a long-range persistence (or periodicity) in the annual flow of the Nile River. The fact that a preponderant number of rivers in the world do not show the long-range persistence or periodicity (Yevjevich 1963), suggests that the probability that it exists in the Nile River is very small indeed. Therefore, one should advance the hypothesis that the combination of stochastic variation, inconsistency in data and non-homogeneity in annual river flows of the Nile River have jointly produced tendency in the time series of Fig. 1. The planners of the New Aswan Dam were wise to use the data of the period after 1903 only for various water resource problems involving the reservoir and the Nile River water allocation.

Another sampling phenomenon in the tropical regions of the Upper Nile River basin may have occurred in the period 1869-1902 that did not occur by chance in the period 1903-1955. An exceptional chance sequence of wet rainfall years may have occurred during the 1869-1902 period. Then this sequence was prolonged as a much longer period of wet runoff years, similarly as the case of the White Nile and the Lake Victoria for the period 1960-1978 demonstrates. This case shows a clear, sampling upward jump in the year 1960,

basically due to an exceptional sequence of wet years of precipitation.

Figure 2 shows the annual water outflows from Lake Victoria in the period

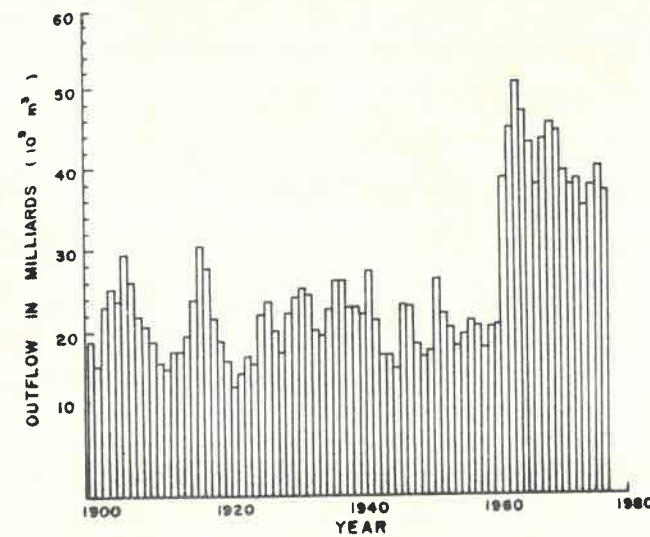


Fig. 2 Annual water outflows from Lake Victoria in 10^9 cubic meters for the period 1900-1978.

1900-1978. The following conclusions can be drawn from this time series (Yevjevich 1983):

- (1) Several wet years in sequence of precipitation started in the early 1960's over the upper basin of the White Nile. They increase significantly the annual outflows from the Lake Victoria in the period 1961-1978 when compared with the average annual outflow for the period 1900-1961;
- (2) The wet year precipitation inputs into the lake led to a very slow tapering off in the subsequent annual outflows; and
- (3) The higher are the annual input and outflow of the lake in wet years, the slower the tapering off in subsequent annual outflows.

Significant water storage in the White Nile basin (lakes, aquifers, soil and plant moisture) is responsible for time dependence in the sequence of annual flows. Recycling of evaporated and evapotranspired waters through additional rainfall within the atmosphere above these regions is another factor that is important in tropical regions, that are composed of large lakes, forests and shallow aquifers. The example of the Victoria Lake (Fig. 3) is illustrative, because this recycling factor becomes the water-carryover from wet years to subsequent years, in addition to water storage in the lake itself.

When one or more very wet years bring significant moisture from the ocean to a tropical region, the local water recycling becomes highly reinforced. As a consequence, the area of the lake increases, the annual evaporation also

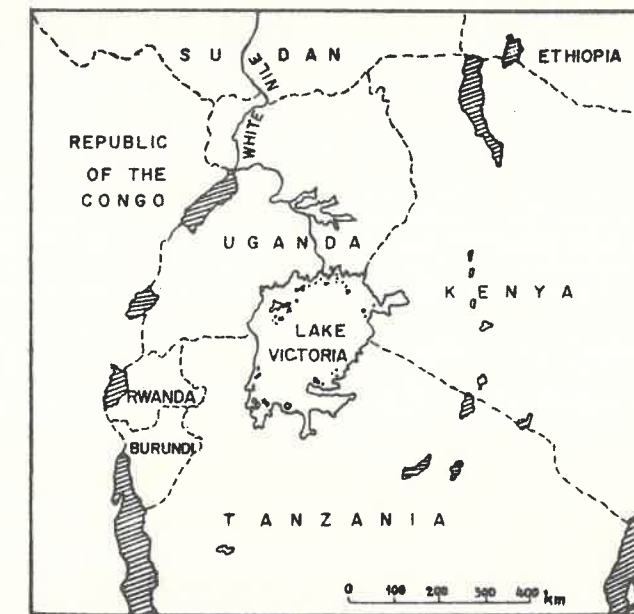


Fig. 3 Lake Victoria with the surrounding lakes and states.

increases, with the ratio of moisture evaporated from the lake in the air masses above it to moisture brought from oceans also increased. This augmentation of the average vapor content in the air and clouds correspondingly increases with moisture precipitability. Years following the very wet precipitation periods may also show larger precipitation over the lake area and around it than the moisture supply from the oceans only would produce. The atmosphere above Lake Victoria and the surrounding areas acts as a water recycling environment.

Figure 4 schematically illustrates the phenomenon. It is supported by

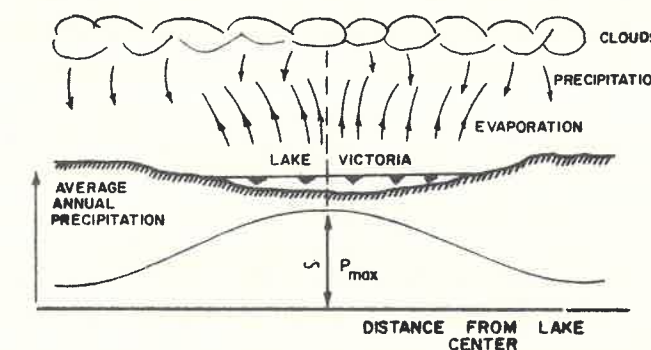


Fig. 4 The local phenomenon of water recycling of Lake Victoria through evaporation and precipitation.

observed data on precipitation over the lake and its surroundings. Observations have shown that the highest average annual precipitation is approximately in the center of the lake, tapering off as the distance from the lake center increases. This is "water recycling": lake-atmosphere-lake and surroundings.

This phenomenon deserves investigation for two reasons: (1) It permits a long-range stochastic forecast of water runoff; and (2) It may explain "the long-range persistence" in flows for short time series of annual flows of rivers in some regions of the world.

3.2 CASE OF THE COLORADO RIVER IN THE UNITED STATES

An instructive example of non-homogeneity in the annual river flow is the Colorado River at Lee's Ferry Station between the upper and lower river basins, is given in Fig. 5. It shows the virgin and measured (historic) annual flows

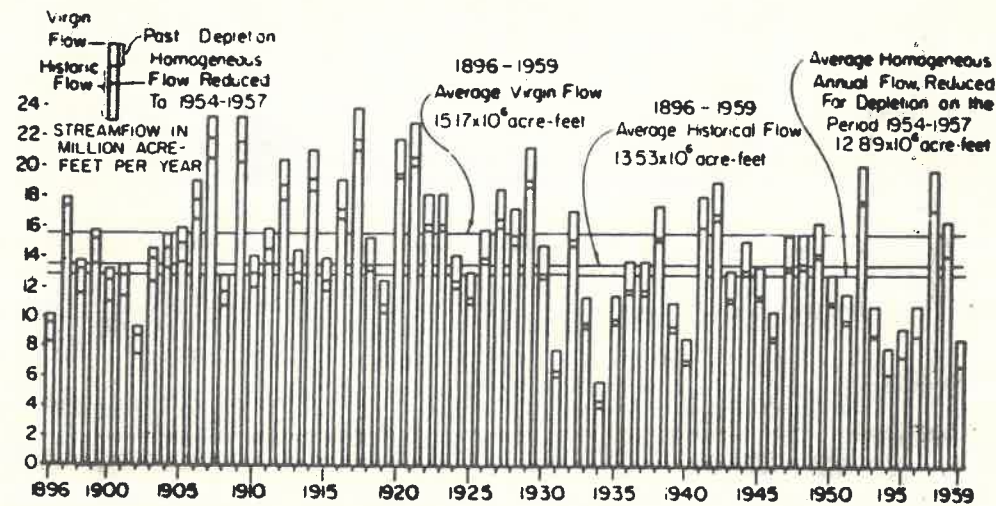


Fig. 5 The Colorado River annual flows at Lee's Ferry, Arizona.

at this station (Yevjevich 1961).

It is likely that inconsistency exists in data prior to 1914. However, the major accurate changes in flows (depletion) are shown for the period after 1914 (during the best collection of data at that station).

For this station, Fig. 6 gives the relationships of three variables: (1) annual depletion, D ; (2) annual virgin flow, V ; and (3) time (as parameter). It is clearly shown that the depletion increased quickly from the turn of the century until the end of World War I, then stayed approximately constant for the period 1920-1930, slowly increased from 1930-1950, then increased quickly from 1954-1957. In this case, the historic annual flow at Lee's Ferry Station is an evolutive (nonstationary) time series. These changes include depletions from all causes: irrigation, uses incidental to irrigation, water exports to areas outside of the drainage basins, domestic and industrial uses, and evaporation from storage reservoirs. The estimate allows credits for any water importation and channel salvage.

To make a series homogeneous and to compensate for depletions, the annual

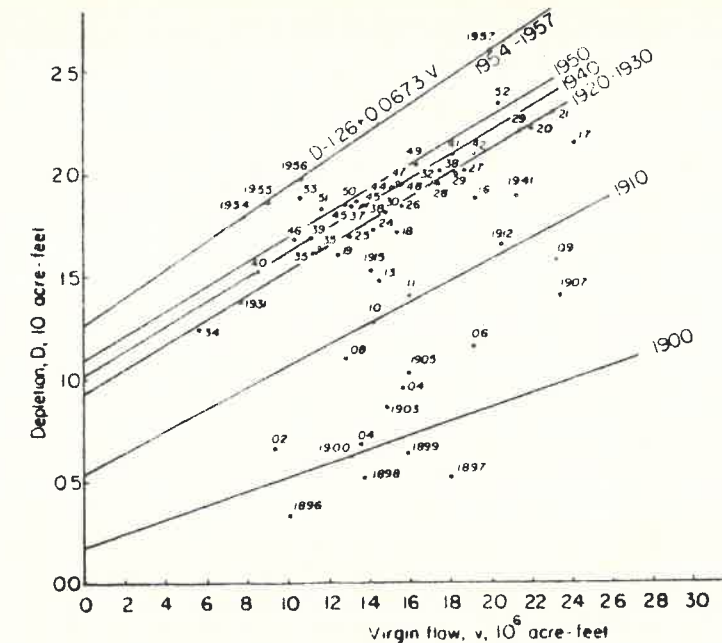


Fig. 6 The relation of the man-made annual flow depletion in the Upper Colorado River at Lee's Ferry Station, Arizona, to the annual virgin flow (historic flow plus depletion) for given time intervals or years, for the period 1896-1957.

virgin flows (which have been approximated) give insight as to what would be the flows if the hydrologic factors of the Upper Colorado River Basin had remained unchanged by man's activities. Although the approximated depletions have errors (because they depend on many factors such as rough and approximate evaluations of net consumptive water uses and on net evaporation from the new water surfaces), and although the computed virgin flows are less accurate than in the case where they coincide with historic (measured) flows, they nevertheless represent a measure of man-made non-homogeneity in the hydrologic records of the Colorado River Basin.

4. STRUCTURAL ANALYSIS, MODELING AND EXTRAPOLATION OF TENDENCY IN PARAMETERS

4.1 TWO APPROACHES TO ANALYSIS

Basically two types of analysis are used for structural analysis of tendency:

(1) Ascertain whether or not a parameter has undergone a permanent or temporary change during the historic sample time; and

(2) What kind of tendency has occurred, with its structure and mathematical models to be found, in two alternatives: (a) estimation of locations and amounts of slippages, with trends inbetween; and (b) estimation of tendency if only a continuous trend exists.

The first approach is best carried out by the split-sample technique.

The tendency in parameters is estimated for each of the two split samples. The distribution of parameters estimates are used either to test whether the two estimates are or are not significantly different, or to test whether their difference is or is not significantly different from zero, in probabilistic terms. The sample may be split in sizes $N/2$ and $N/2$, if nothing is known where and how long a change in parameter has occurred, or it may be split in N_1 and N_2 , with $N_1 + N_2 = N$ (sample size), if there is knowledge that the trend occurred only either along the first N_1 values or along the latter N_2 values. If the occurrence of a slippage is known, and clearly indicated by a visual inspection of the sample time series, the sample should be split at the location of the slippage. If no tendency is found by this approach, no further analysis would be necessary. If the hypothesis of significant tendency is accepted, then the second approach is followed.

4.2 GENERAL MODELS

The general model of a mixture of slippages and trend lines inbetween is

$$T_a(t) = f_1(t)_{t_0}^{t_1} + \Delta T_{t_1} + f_2(t)_{t_1}^{t_2} + \Delta T_{t_2} + \dots + f_{n+1}(t)_{t_n}^N \quad (1)$$

where ΔT = are positive or negative slippages at positions $t = t_1, t_2, \dots, t_n$, to be inferred first, and $f_i(t)_{t_{i-1}}^{t_i}$ = the trend line functions to be fitted for series segments between the locations t_{i-1} and t_i .

It is often reasonable to assume the trend-like functions to be monotonic so that they can be used in power series form

$$f_i(t)_{t_{i-1}}^{t_i} = a_i + b_i t + c_i t^2 + \dots \quad (2)$$

with the proper estimation of coefficients a_i, b_i, c_i, \dots from data for each segment between slippages. Standard techniques of testing significance of the trend coefficients can be applied. This approach is feasible for the trend lines in the mean of annual values of a series.

The other trend-prone parameters, such as the standard deviation, the first serial correlation and the others, cannot be studied in the same detail and accuracy as the mean by the above Eqs. (1) and (2). The reason is that the other parameters have to be estimated from small segments of subseries of the historic series (such subseries as five or ten years long), so that a fine time resolution of changes cannot be made as in the case of the mean. However,

often a sudden change in the mean also implies a simultaneous change in other parameters. In that case, information on tendency in the mean are transferred to the other parameters (say that changes occur at the same times for slippages and for the same segments of time for the continuous trends).

4.3 EXAMPLE OF THE COLORADO RIVER

The depletion (non-homogeneity) model is presented as the annual water depletion (D) versus the annual virgin flow (V) for a given period of years. They are approximated by straight lines (Fig. 6) because a complex model would not be justified in view of all the errors involved. For example, the model for the period 1954-1957, obtained by the Bureau of Reclamation, is

$$D = 1.26 + 0.0673 V \quad (3)$$

Figure 6 shows that coefficients A and B increase with time, with greater average depletion per year with time. The historic annual flows at Lee's Ferry Station are a non-homogeneous (non-stationary) time series. In statistical terms, the information from 64 years of annual flows at this station is derived from a mixture of populations. Theoretically, that mixture of populations may be related probabilistically if the model of change with time from one population to the next is known. Because most changes are water resources developments, the approach of treating the mixture of populations in annual runoff is not feasible. Instead, the techniques of reducing the non-homogeneous series to homogeneous series are currently practiced.

It is extremely difficult to project the depletion of annual runoff in amount and in time at this station for three to five decades with a sufficient accuracy. It would require the projection of all future reservoirs, diversions, irrigation schemes, etc., exactly in runoff amount and in time for the next 30-50 years. If an approximate depletion projection is acceptable, it would be feasible to treat the future projected water supplies by the concept of the mixture of populations. Extrapolation of tendency (slippages and trends) into the future is, however, subject to all the uncertainties of projections into the future.

The computation of virgin annual flows at the Lee's Ferry Station from 1896 to 1959 produces then the homogeneous sample. By applying the depletion model of Eq. (3) to virgin flows of the sample of 1896-1959, a new homogeneous sample can be obtained for any period. The homogeneous sample reduced to the period 1954-1957 is also given in Fig. 5.

By extrapolation of the depletion model $D=A+B V$ (or any other, more complex model) into the future, with A and B functions of time, it will be possible

to reduce the virgin flow sample of 1896-1959 to any future time. In planning the future Colorado River Basin development, it will be feasible to project the depletion model into the future, if not in function of time then at least in function of future projects (or even the population growth). In this case, the new variate V_t , the annual flows at Lee's Ferry Station, for a given future will be

$$V_t = V - D_t = (1 - B_t) V - A_t \quad (4)$$

with A_t and B_t parameters of depletion at time t . With the probability distribution of V and its sequential dependence, the probability distribution and the sequential dependence for V_t can then be derived as a function of t . This approach would enable the computation of the average hydrologic characteristics during the depreciation time of a future water resource project.

4.4 CONCLUSIONS ON MODELING FOR PURPOSES OF FUTURE USES

The above discussion leads to the conclusion that the computation of effects of man-made structures and measures in river basins has an important bearing on the reliability of hydrologic data used for future water resource developments and on the future water project operations. The investigations aimed at making the hydrologic samples homogeneous through the computation and analysis of depletion models, becomes an important task of hydrologic studies.

An essential practice in water resource planning and design is to use the past observations, make inferences about the population of a hydrologic variable, and expect that the basic properties will hold true in future samples. When the past data show inconsistency and non-homogeneity, the statistically inferred population may not be that of the future samples. Future samples may not have non-homogeneity or they may experience another type. Two examples, the Nile River and the Colorado River, illustrated inconsistency and non-homogeneity in order to show the importance and ways of treating tendency.

5. EFFECTS OF UNREMOVED OR OVERREMOVED TENDENCY

5.1 BASIC APPROACH TO UNDERSTANDING CONSEQUENCES OF UNREMOVED OR OVERREMOVED TENDENCY

It has been shown (Yevjevich and Jang 1967 and 1969) that any slippage or any trend introduced into the mean of an independent stationary time series produces a dependent series with apparent changes in the probability distribution, when that series is treated as a tendency-free and stationary process. The effects on the probability distribution are sufficiently known if effects on its mean, variance, skewness and kurtosis are determined. Similarly, any slippage or trend introduced into a dependent stationary stochastic series or

into a periodic-stochastic series will change all the parameters of that series and will increase the dependence, if that series is assumed to be tendency-free stationary, or tendency-free periodic-stochastic series.

The analysis of effects of unremoved or overremoved tendency may be studied either analytically for simple series and tendency, or by the data generation method for complex series and/or complex tendency. In both cases, the analysis may be carried out under these three premises:

- (1) The population characteristics are known;
- (2) The known tendency in parameters is introduced; and
- (3) The known process with known tendency introduced are treated either

as a stationary stochastic or a periodic-stochastic series, as if they were without tendency in parameters. This approach then enables the assessments of effects of slippages and trends in parameters on the characteristics of the original processes.

5.2 CASE OF A SIMPLE SLIPPAGE (JUMP)

The known process is assumed to be an independent stationary process with the known slippage in the mean in the middle of a sample as a jump δ , or at $q=0.50$ for the relative sample size $q=1.00$ with $q=n/N$, N =the sample size and n =the position of the jump counted from the sample end. Figure 7 gives this

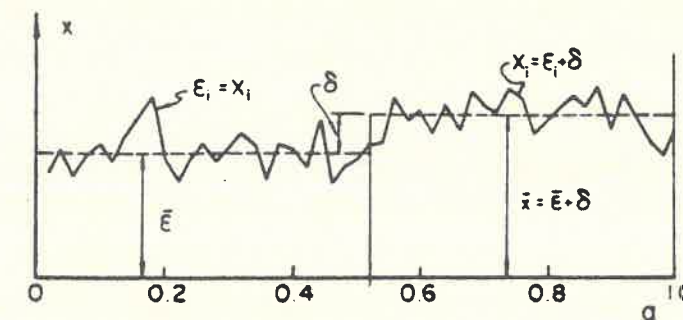


Fig. 7 A scheme of the constant jump introduced into an independent homogeneous series, ϵ_t .

case. The variable ϵ_t is assumed normal independent process, (mean $\bar{\epsilon}_t$ and sample standard deviation s_ϵ). If the sample of Fig. 7 is treated as mixed distribution of the two normal independent processes with $N(\bar{\epsilon}, s_\epsilon)$ and $N(\bar{\epsilon} + \delta, s_\epsilon)$, the analytical solution for the expected sample distribution can be obtained, with the resulting probability density curves functions of δ . Figure 8 shows these results for four values of δ ($=0.0, 1.0, 2.0$ and 3.0). It shows well the distortions in the probability density curves as δ increases in comparison with the expected mean of zero.

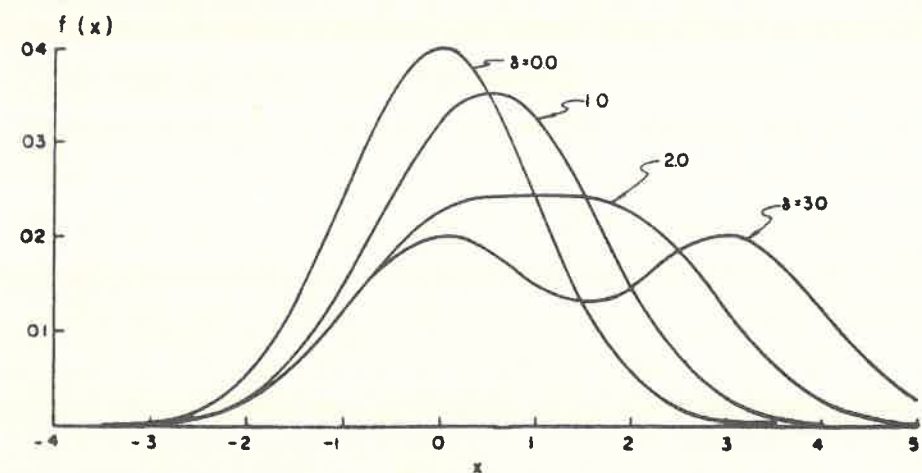


Fig. 8 Probability density functions for various values δ with $\bar{\epsilon}=0$, $\sigma_{\epsilon}=1.0$ and $q=0.5$ (after Yevjevich and Jang 1969).

5.3 CASE OF A SIMPLE LINEAR TREND

The linear trend in the sample mean may be written as

$$x_t = \epsilon_t + a + bt \quad (5)$$

where ϵ_t = the trend-free process, x_t = the variable with the linear trend, t = the time along the sample of size N , and a and b = the trend parameters. The mean of the x_t process is

$$\bar{x} = \bar{\epsilon} + a + \frac{1}{2}bN \quad (6)$$

with $\bar{\epsilon}$ and \bar{x} = the sample means of ϵ_t and x_t , respectively. For the symmetrical trend (which passes through the point $\bar{\epsilon}$, $N/2$), $a = -bN/2$, with $\bar{\epsilon} = \bar{x}$. Designating $\theta = bN$, and for ϵ_t a lognormal independent process, with $E \epsilon_t = 0$ and $\text{var } \epsilon_t = 1$, for the linear trend of Eq. (5), the changes in the probability density curve of this lognormal independent process are shown in Fig. 9, for four values of

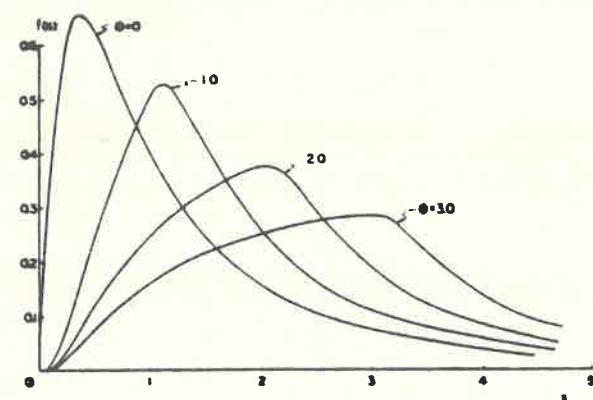


Fig. 9 Probability density curves of x_t with the linear trend, $x_t = a + bt + \epsilon_t$, and ϵ_t the independent lognormal variable, for four values of $\theta = bN$.

$\theta = bN$ ($=0, 1.0, 2.0, 3.0$), if the trend is neglected and process with the trend in the mean, superposed on ϵ_t , is considered as trend-free sample.

5.4 CASE OF A GENERAL COMPLEX TENDENCY

This hypothetical case was selected to investigate the effects of non-homogeneity that is introduced into an independent stationary, normal stochastic series, with mean zero and variance unity $N(0,1,0)$ on time dependence. Five samples of 200 random independent normal numbers were generated, or 1000 numbers of ϵ_i divided into five samples. For each sample of $N=200$, the non-homogeneity is introduced in five equal subsamples (0-40, 41-80, 81-120, 121-160 and 161-200). The following non-homogeneities are introduced to the values i along the five samples, $i=1,2,\dots,200$:

- (1) For $i=1-40$, a linear trend, $x_i = \epsilon_i - 0.30 + 0.20 i$;
- (2) For $i=41-80$, a slippage of $\delta=0.50$, so that at any position $i=81-120$ the values $x_i = \epsilon_i + 0.50$;
- (3) For $i=81-120$, another slippage of $\delta=-0.40$, with $x_i = \epsilon_i - 0.40$;
- (4) For $i=121-160$, the linear trend is $x_j = \epsilon_j + 0.45 - 0.30 j$, where $j=1$ for $i=121$ and $j=40$ for $i=160$; and
- (5) For $i=161-200$, the linear jump, as $x_i = 1.25 \epsilon_i$.

Figure 10 shows the correlograms of ϵ_i and x_i of this example, with $\bar{r}_k(\epsilon_i)$

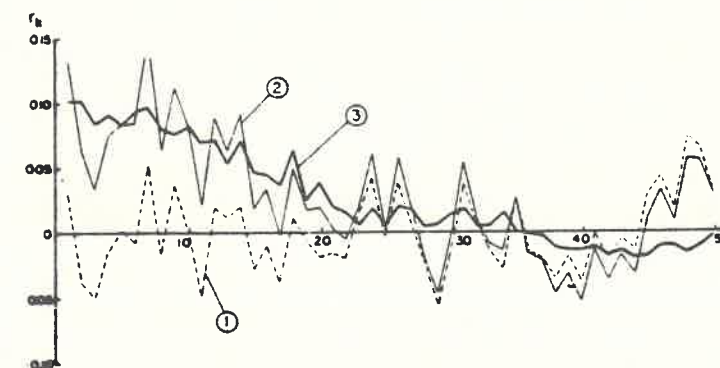


Fig. 10 Correlograms of the two series of the example: (1) Average values $\bar{r}_k(\epsilon_i)$ for five samples of $N=200$ for the independent ϵ_i -series; (2) Average values of $\bar{r}_k(x_i)$ for five samples of $N=200$ of the non-homogeneous x_i -series, with strong non-homogeneities introduced into ϵ_i ; and (3) Differences $\Delta \bar{r}_k = \bar{r}_k(x_i) - \bar{r}_k(\epsilon_i)$.

and $\bar{r}_k(x_i)$ the averages of five values, estimated for each of the five samples of $N=200$. The differences $\Delta \bar{r}_k$ are positive. They decrease from about $\Delta \bar{r}_1 = 0.10$ for $k=1$ to approximately zero for $k=35$. This example of strong non-homogeneities shows that the effects of non-homogeneity on estimated dependence of a sample are significant and cannot be neglected in the analysis of properties of a

hydrologic time series, if they are not properly modeled and removed.

5.5 GENERAL CONSEQUENCES OF UNREMOVED OR OVERREMOVED TENDENCY IN PARAMETERS

Significant trends or slippages in historic samples are often neglected (assumed either they do not exist, or if they do that they do not have a significant effect on series structure and model). Also, they may be inferred to exist but in larger values than the true trends or slippages, and then over-removed. This unremoved or overremoved tendency is passed along into the series structural analysis, mathematical modeling and parameter estimation. They create distortions in treatment of intermittency, in normalization of the process, the study of periodicity and particularly in dependence structure of the stochastic component.

The correlograms of isolated stochastic components sometimes show a rapid decrease of autocorrelation coefficients, and then very slow tapering off, with the slow convergence to zero. The slow convergence to zero for larger values of k may partially be the result of inconsistency and non-homogeneity in sample parameters. It would be a very wise approach to first study for hydrologic series whether a very slow tail of a correlogram was or was not a result of tendency in the sample series, before the other hypotheses (such as long-term resistance) are advanced and/or tested.

6. TENDENCY DISCRIMINATION TECHNIQUES

An entire group of hydrologic problems is related to discrimination (identification) of changes in parameters. Two types of these changes, often referred to as the "intervention changes" to be studied are:

(1) Changes that are desired, with the problem arising of whether or not the measures taken produce these intended changes. Such typical examples are: (a) weather modification, in hydrology basically by cloud seeding for purposes of increasing the water budget; (b) weather modification for suppression of extremes (large storm intensities, hail, etc.); (c) soil conservation with the expected increase of infiltration and groundwater yield, flood peak decrease, sediment transport decrease, etc., and (d) management of river basins for an optimal production of timber, grazing grasses, water erosion control, etc.

(2) Changes that are not objectively desired, with their detections, such as: (a) effects of urbanization, communication lines and industrialization on hydrologic (and even meteorologic) parameters; (b) changes in water quality by industry, agriculture, forestry used chemicals, etc., or the basic parameters of water quality; (c) forest fires effects; (d) eventual climatic effects by urbanization; etc.

The discrimination analysis has progressed well in the last 20 years, both in general statistics and in its application to hydrology and water resources (Box et al. 1965; Gardner 1969; Hinkley 1970, Hipel et al. 1975 and 1977; Kander and Zachs 1966; Kelley 1977; Lee et al. 1977; Lettenmaier 1975 and 1976; Naik 1975; Rothacher 1970; Sen and Srivastava 1975 and 1975). Most difficulties in acceptance of results of statistical inferences in intervention analysis have been encountered in the area of discriminating changes induced by artificial weather modification (cloud seeding) into precipitation and runoff series.

The studies of effects of weather modification has produced a large number of references, in order to answer the basic discrimination question, namely whether the changes were statistically significant or not. Detailed discussions of discrimination of hydrologic changes due to cloud seeding can be found in two publications of Dumas and Morel-Seytoux (1969) and Nimmannit and Morel-Seytoux (1969), related to runoff impacts of cloud seeding operational project of the U.S. Bureau of Reclamation, undertaken in Colorado. (For further information on weather modification, see Gilman et al. 1965; Markovic 1966; Hurley 1968; and many recent references).

For the use of annual or seasonal flows for discrimination of weather modification of some rivers in Colorado, the following expression was used (Dumas and Morel-Seytoux 1969)

$$m = 4(1-\rho^2) \frac{C_{v,t}^2}{h^2} \quad (7)$$

where: m =the number of years needed for the significance level of 95% detection, ρ =the correlation coefficient between the annual or seasonal flow of target and control river basins, $C_{v,t}$ =the coefficient of variation of annual or seasonal flows of the target river basin, and h =the percentage of increase in annual or seasonal flow due to cloud seeding over the target basin (assuming no contamination of air masses over the control basin occurred by seeding the air masses over the target basin).

The basic problem in design of experiments in intervention analysis is how to reduce m of Eq. (7) in order to arrive at significance or no significance. Several approaches are available for an answer:

(1) To study the structure of the series used (daily, weekly, monthly, seasonal, annual) and to find the exact or the most accurate distribution of the testing parameters (Student t , chi-square, etc.) that matches this structure;

(2) To use the short-interval series (say daily time series) which by definition should contain more information about a process than the long-interval series (say monthly time series) that is obtained by aggregation (or summation) of short-interval values contained in the long-interval, regardless of the fact that the variation and dependence of a series increase with a decrease of the time series interval (it is expected that the effects of an increase of the sample size overcompensate for the increase in parameter variation and in time dependence); and

(3) Space grouping of target and control river basins, so that the chance variations in flows may be smoothed while the change is maintained as an average value.

Two approaches can be used in the discrimination: (1) the use of time series of a basin, which has sufficiently long observations both prior to and after the intervention; and (2) the use of a target (cloud seeded) basin and a control basin. The first approach needs longer observations than the second, with this latter being in some way a trade-off between the time (which is not available) and the space (which can be limited in use only by geographic and economic factors).

The target-control approach is based on the correlation between the streamflows, of a seeded large watershed and an adjacent untreated watershed with its flows not affected by cloud seeding. This approach is then based on three assumptions:

- (1) The flows of target and control basins are well correlated;
- (2) The control watershed is not affected by cloud seeding; and
- (3) The target streamflows are independent in sequence or close to it (such as seasonal flows of successive years, or annual flows).

7. DOUBLE-MASS CURVE ANALYSIS FOR DETECTION OF TENDENCY

Double-mass curve is a classical hydrologic technique for detecting tendency in the mean of hydrologic series. Some works represent the state-of-the-art on the subject (Wigbout 1973; Chang and Lee 1974).

Assume X_1, \dots, X_n to be successive hydrologic observations at a gauging station, hypothesized to have tendency (slippages) in the mean, and Y_1, \dots, Y_n the corresponding observations of the nearby gauging station, assumed to have no tendency in the mean, or the average of the observations at several nearby stations of the same variable, all without the tendency. The sum of X_i and the sum of Y_i are:

$$S_1 = X_1, S_2 = X_1 + X_2, \dots, S_i = X_1 + \dots + X_i, S_n = \sum_{i=1}^n X_i \quad (8)$$

and

$$Q_1 = Y_1, Q_2 = Y_1 + Y_2, \dots, Q_i = Y_1 + \dots + Y_i, Q_n = \sum_{i=1}^n Y_i \quad (9)$$

The corresponding values (S_i, Q_i) are plotted and the lines fitted through the points, usually called the double-mass curve. The sums S_i and Q_i are positive quantities, with the double-mass curve going from zero on in the first coordinate quadrant. The fitted curves for the stations without tendency are usually straight lines. The slope of the curve has one or more breaks if there is a change in data of the station with tendency.

Statistical tests of split samples, based on variance, covariance and regression analysis may be used to ascertain the significance of the graphically shown breaks in the double-mass straight lines. Some dangers are evident if the statistical analysis is assumed to have a high confidence (Wigbout 1973). Chang and Lee (1974) have proposed the computerized method of double-mass analysis, to avoid the inference with a high subjectivity.

The double-mass curve is mainly based on the graphical visual inference for detecting the change in the mean. The analysis of differences $X_t - Y_t$ or $X_t - bY_t$ (with b =the line slope) is an alternate approach to be used either graphically or analytically (Wigbout 1973). A single series analysis for tendency is in some way equivalent to the analysis of the above differences.

8. CONCLUSIONS

Several basic conclusions can be derived from the preceding text:

(1) One of the most difficult hydrologic subjects to treat is the identification (discrimination) of tendencies in series parameters, their removal from the historic series, and their projections into the future for water resources planning objectives.

(2) Four basic sources of tendencies in parameters of hydrologic series are: (a) sampling tendency; (b) systematic errors in data (inconsistency); (c) natural disruptions and their evolutions (natural non-homogeneity); and (d) man-made tendency in parameters caused by various changes and developments in river basins (human induced non-homogeneity). It is extremely difficult to discriminate among these four sources of tendencies without significant and painful efforts of various types, with high probabilities of drawing incorrect inferences even with these efforts.

(3) All parameters of a hydrologic series may be subject to tendency,

however, with different types and sizes of tendency.

(4) Historic samples of all major rivers of the world, that have been subject to population growth and river basin developments, show significant tendency in parameters.

(5) One method of treating the tendency in parameters is by developing models of water depletions, however, basically those due to man-made activities (urbanization, reservoirs, irrigation, transmountain diversions, etc.).

(6) Best results in identification of tendency is by combining the appropriate statistical discrimination techniques with the history of observations and the history of water resources developments (depletion approach or otherwise).

(7) History of discrimination of weather modification attainments serves as the best example of limitations, even of the best statistical techniques in identification of changes when they are relatively small.

(8) The double-mass curve for discrimination of changes in the mean of a historic time series is an approximate technique which can be considered as a first approximation of relatively inexpensive efforts before the more advanced methods of large efforts are undertaken.

REFERENCES

- (1) Box, G.E.P. and George C. Tiao, 1965, A Change in Level of a Non-Stationary Time Series, *Biometrika*, 52, pp. 181-192.
- (2) Box, G.E.P. and George C. Tiao, 1965, Intervention Analysis with Applications to Economic and Environmental Problems, *Journal of American Statist. Association*, 70, pp. 70-79.
- (3) Chang, Minteh and Richard Lee, 1974, Objective Double-Mass Analysis, *Water Resources Research*, 10, pp. 1123-1126.
- (4) Dumas, A.J. and H.J. Morel-Seytaux, 1969, Statistical Discrimination of Change in Daily Runoff, *Colorado State University Hydrology Papers*, No. 34, August, pp. 1-29.
- (5) Gardner, L.A., Jr., 1969, On Detecting Changes in the Mean of Normal Variates, *Annals of Math. Statist.*, 40, pp. 116-126.
- (6) Gilman, Donald, L., James R. Hibbas and Paul L. Laskin, 1965, Weather and Climate Modification, U.S. Weather Bureau, July 10.
- (7) Hinkley, David V., 1970, Inference About the Change-Point in a Sequence of Random Variables, *Biometrika*, 57, pp. 1-17.
- (8) Hipel, Keith William, W.C. Lennox, T.E. Unny and Angus Ian McLeod, 1975, Intervention Analysis in Water Resources, *Water Resources Research*, 11, pp. 855-861.

- (9) Hipel, Keith William, Angus Ian McLeod and Edward Arthur McBean, 1977, Stochastic Modeling of the Effects of Reservoir Operation, *Journal of Hydrology*, 32, pp. 97-113.
- (10) Hurley, Patrick A., 1968, Augmenting Colorado River by Weather Modification, *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 94, No. IR4, Proc. Paper 6271, December, pp. 363-380.
- (11) Hurst, Black, Simaika, 1946, The Nile Basin, Vol. 7, The Future Conservation of the Nile: S.O.P. Press, Cairo, Egypt.
- (12) Kander, F. and S. Zachs, 1966, Test Procedures for Possible Changes in Parameters of Statistical Distributions Occurring of Unknown Time Points, *Annals of Math. Statist.*, 37, pp. 1196-1210.
- (13) Kelley, Thomas A., 1977, Sequential Bayes Estimation of the Difference Between Mean, *Annals of Statistics*, 5, pp. 379-384.
- (14) Lee, Austin, F.S. and Sylon M. Heghinian, 1977, A Shift of the Mean Level in a Sequence of Independent Normal Random Variables--A Bayesian Approach, *Technometrics*, 19, pp. 509-516.
- (15) Lettenmaier, Dennis P., 1975, Detection of Trends in Water Quality Data with Dependent Observations, Presented at Spring Annual Meeting, American Geophysical Union.
- (16) Lettenmaier, Dennis P., 1976, Application of Intervention Analysis to Environmental Impact Assessment, Presented at Symposium on Methodologies for Environmental Assessments in Energy Development Regions.
- (17) Markovic, R.D., 1966, Statistical Evaluation of Weather Modification Attainments, *Hydrology Paper No. 16*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, November, 44 p.
- (18) Naik, Umesh C., 1975, On Testing Equality of Means of Correlated Variables with Incomplete Data, *Biometrika*, 62, pp. 615-622.
- (19) Nimmanit, V. and H.F. Morel-Seytaux, 1969, Regional Discrimination of Change in Runoff, *Colorado State University Hydrology Papers*, No. 37, November, pp. 1-40.
- (20) Rothacher, Jack, 1970, Increases in Water Yield Following Clear-cut Logging in the Pacific Northwest, *Water Resources Research*, 6, pp. 653-658.
- (21) Sen, Ashigh and Muni S. Srivastava, 1975, Some One-Sided Tests for Change in Level, *Technometrics*, 17, pp. 61-64.
- (22) Sen, Ashigh and Muni S. Srivastava, 1975, On Tests for Detecting Change in Mean, *Annals of Statistics*, 3, pp. 98-108.
- (23) Wigbout, M., 1973, Limitations in the Use of Double-Mass Curves, *Journal of Hydrology*, 12, pp. 132-138.
- (24) Yevjevich, V., 1961, Some General Aspects of Fluctuations of Annual Runoff in the Upper Colorado River Basin, *Colorado State University Publication*, October, Fort Collins, Colorado.

- (25) Yevjevich, V., 1963, Fluctuations of Wet and Dry Years, Part I, Research Data Assembly and Mathematical Models, Colorado State University Hydrology Paper No 1., July, Fort Collins, Colorado.
- (26) Yevjevich, V. and R.I. Jang, 1967, Effects of Inconsistency and Non-homogeneity on Hydrologic Time Series, Proceedings of the Fort Collins First International Hydrology Symposium, Vol. I, pp. 451-458.
- (27) Yevjevich, V. and R.I. Jang, 1969, Properties of Non-homogeneous Hydrologic Papers Series, No. 32, April, 33 p.
- (28) Yevjevich, V., 1983, The Nile River Basin: Hardcore and Softcore Water Projects, Water International (Journal), Vol. 8, pp. 23-34.

ACKNOWLEDGMENT

The research leading to this paper is sponsored by the U.S. National Science Foundation, Grant No. CME-7916817. The travel support to attend the U.S.-Uruguayan Workshop, to present this paper, was sponsored by the NSF International Programs (Latin American Program). Both sponsorships are duly acknowledged.

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

PROPUESTA PARA UN ESTUDIO DE MORFOMETRIA DE LA
CUENCA DEL RIO TACUAREMBO UTILIZANDO
IMAGENES DE SATELITE

Lic. Ana María C. Martínez

Montevideo-Uruguay

INDICE.

1. Introducción

1.1. Fuentes de información

- . Uso de la documentación

2. Desarrollo de la metodología

2.1. Caracterización del área

- . Geología
- . Red fluvial
- . Geomorfología
- . Suelos

2.2. Propuesta metodológica

- . Jerarquización de cuencas
- . Aplicación de índices relacionados con la forma de la cuenca
- . Medidas de textura de drenaje
- . Cuantificación de datos

2.3. Aplicación de la morfometría

- . Selección de cuencas
- . Caracterización de las cuencas
- . Análisis y comparación de valores hallados

2.4. Comprobación de la hipótesis

3. Conclusiones y recomendaciones

4. Bibliografía

- Anexo I

Agradecimientos.

INDICE DE MAPAS

	Pág.
1. Ubicación de la cuenca	422
2. Límites de la cuenca . Ubicación.	423
3. Mapa geológico	426
4. Red fluvial	428
5. Mapa de suelos	434
6. Cuenca 1	442
7. Cuenca 2	444
8. Cuenca 3	446
9. Cuenca 4	447
10. Cuenca 5	449

INDICE DE FIGURAS

No. Tema	Pág.
1. Relación de bifurcación	452
2. Relación de longitud	453
3. Distribución de frecuencias relativas de cursos de primer orden, segundo orden e intercuencas (longitudes) de todas las cuencas.	455
4. Idem	456
5. Idem	457
6. Idem	458
7. Idem	459
8. Representación de medias de ángulos de confluencias.	461
9. Idem	461
10. Idem	461
11. Idem	461
12. Idem	461
13. Prueba t	464
14. Prueba t aplicada a longitudes de cursos de agua	465
15. Prueba t aplicada a longitudes de cursos de agua incluyendo intercuencas	466
16. Prueba t aplicada a ángulos de confluencias.	467

INDICE DE CUADROS	Pág.
1. Datos. Cuenca 1	441
2. Datos. Cuenca 2	443
3. Datos. Cuenca 3	445
4. Datos. Cuenca 4	448
5. Datos. Cuenca 5	450
6. Relación de bifurcación	452
7. Relación de longitud	453
8. Longitudes de cursos de agua	454
9. Comportamiento de ángulos	460
10. Índices indicadores de forma	462
11. Número de confluencias por unidad de área	462
12. Índices de textura de drenaje	463

1. INTRODUCCION

Este trabajo fue propuesto por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, quien además proporcionó imágenes de satélite. Se realiza con el apoyo del Instituto de Teoría de la Arquitectura y Urbanismo de la Facultad de Arquitectura y con orientación técnica en Sensores Remotos e Hidrología de la Dirección de Suelos del Ministerio de Agricultura y Pesca.-

En este estudio se intenta determinar una metodología para conocer el comportamiento de la red hidrográfica del río Tacuarembó, utilizando imágenes de satélite como fuente de información.-

En nuestro país existe el antecedente de una categorización de cuencas realizado por el Instituto de Teoría de la Arquitectura y Urbanismo presentado en el trabajo: "Instrumentación operativa a nivel territorial para una orientación del uso y control de los recursos naturales".-

De acuerdo a la finalidad del presente trabajo, a las características de la cuenca y su red de drenaje, a la fuente de información utilizada, se eligió partir de un estudio de geomorfología — cuantitativa. Se propone aplicar una metodología en la cual se realiza un estudio cuantitativo de cuencas menores de la red hidrográfica mediante un análisis morfométrico, que aplicada posteriormente a toda la cuenca nos va a permitir acceder a un conocimiento más exacto de la cuenca del río Tacuarembó como sistema.-

Se plantearon los siguientes objetivos:

I. Generales:

- Desarrollar una metodología para evaluar el comportamiento de la red hidrográfica del río Tacuarembó utilizando imágenes de satélite.
- Mediante un análisis cuidadoso de una imagen de satélite, realizar un tratamiento que pueda proporcionar la mayor información de la red hidrográfica de la cuenca del río Tacuarembó.

II. Específicos:

- Establecer una caracterización de los cursos de agua.
- Establecer una relación entre los padrones de drenaje desarrollados sobre las diferentes litologías con las diferentes texturas de las imágenes de satélite.-
- Identificación de unidades geomorfológicas de acuerdo a padrones de drenaje homogéneos.

- Ubicación de los diferentes tipos y subtipos de las formas de relieve en las imágenes de satélite.-

La hipótesis de trabajo que se formuló luego de la observación de las fuentes de información, fue la siguiente:

. Suponiendo que las condiciones climáticas son homogéneas para toda el área, el padrón de drenaje que desarrollan las cuencas menores que comprenden la cuenca del río Tacuarembó está relacionado con la litología y características texturales y estructurales de los suelos.-

Para el desarrollo del trabajo se siguió el siguiente esquema metodológico:

I-. Investigación bibliográfica, antecedentes.

- . Definición de objetivos.
- . Formulación de la hipótesis.
- . Diseño del estudio.

II-. Búsqueda de información:

- . Fotelectura de imágenes de satélite.
- . confección de carta de red de drenaje.
- . Ampliación de cartas geológica y de suelos.
- . Planteamiento de la metodología.
- . Selección de cuencas.
- . Aplicación de la metodología.
- . Colección de datos.

Medición: - Longitudes

- Areas

- Angulos

. Cuantificación y análisis de datos.

. Análisis de los resultados de la investigación.

III-. Comprobación de la hipótesis.

IV-. Conclusiones y recomendaciones.

1.1. FUENTES DE INFORMACION.

Se utilizó como fuente de información la siguiente documentación:

a) Imágenes de satélite: es la documentación básica sobre la que se trabajó.

Se utilizaron dos juegos de imágenes LANDSAT en bandas 5 y 7 - caracterizadas como:

CNPQ/INPE/LANDSAT 279176-124629-5 de fecha 31.1.80

CNPQ/INPE/LANDSAT 279176-124629-7 de fecha 31.1.80

CNPQ/INPE/LANDSAT 37933-124951-5 de fecha 13.3.79

CNPQ/INPE/LANDSAT 37933-124951-7 de fecha 13.3.79

La escala aproximada es de 1:250.000, tienen un poder de resolución de 4.000 m² aproximadamente y cada una cubre un área de 33.750 km².-

La casi totalidad de la cuenca está comprendida dentro del juego de imágenes, exceptuando una pequeña parte del sector Noroeste.

Están impresas en blanco y negro en papel, de dimensiones de 1m por 0,9m.-

Fueron procesadas por el Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil.-

b) Cartas:

Carta geológica del Uruguay, Bossi et al. (1975) - Escala 1:1.000.000.-

Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (1976) - D.S. (MAP) - Escala 1:1.000.000.-

Carta geográfica del Uruguay - (1974) S.G.M. Escala: 1:500.000.

c) Fotos aéreas: Escala 1:40.000.-

Uso de la documentación.

Imágenes de satélite. Se realizó como primer paso una observación general de las imágenes, se vio qué elementos se apreciaban mejor y en qué tonalidad. En la banda 5 se aprecian mejor los depósitos aluviales (de color blanco fundamentalmente arenales), erosión de suelos, bosques naturales, áreas urbanizadas y caminería.

En la imagen de banda 7 se aprecian mejor la red de drenaje, bosques artificiales, uso del suelo, las áreas de humedad permanente y los embalses.-

El trazado de la red de drenaje se realizó en una transparencia. Se utilizaron las imágenes de la banda 7, para complementar la información se utilizó la banda 5. El curso inferior de los ríos secundarios con éstos, fue trazado utilizando fotos aéreas a escala 1:40.000, en razón de que no eran fácilmente distinguibles.-

Para realizar la diferenciación de unidades geomorfológicas, se utilizó las imágenes de la banda 7, el mapa geológico, y las descripciones de las unidades dadas por el Profesor Chebataroff (1975)

y la carta de suelos. Se ubicaron las diferentes formas de relieve comparando el mapa geológico, la descripción de las formas dadas por las fuentes de información indicadas y se establecieron las relaciones con las diferentes texturas de las imágenes de satélite.

Cartas geológica y de suelos. Fueron ampliadas a la misma escala de las imágenes (1:250.000) las que se superpusieron a la carta confeccionada de la red de drenaje.-

Carta geográfica. Se utilizó para la ubicación de ríos y límites naturales.-

Fotos aéreas. Se utilizó para el trazado de los cursos inferiores de los ríos. No se realizó fotointerpretación.-

2. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA

2.1. CARACTERIZACION DEL AREA

La cuenca del río Tacuarembó está situada al Noreste de la República Oriental del Uruguay, entre los 30°49' y 32°24' de latitud Sur y los 54°42' y 56°19' de longitud Oeste.-

El río Tacuarembó es uno de los afluentes más extensos del río Negro, y comprende la mayor parte de los departamentos de Rivera y Tacuarembó. Ocupa una superficie aproximada de 16.954 km². (Mapa 1)

El clima es templado subtropical semihúmedo. La precipitación media anual es de 1.000 a casi 1.400mm en las cercanías de la ciudad de Rivera, las temperaturas medias anuales oscilan entre los 17°C y los 1°C.

La vegetación predominante es de pradera, en los bordes de los cursos de agua es de bosques galerías de especies indígenas, en su mayoría subtropicales. En las zonas pedregosas y serranías hay montes serranos.-

La actividad fundamental es la ganadería. La agricultura se practica en áreas poco extendidas, en suelos arenosos se cultivan papas, maní, frutales cítricos, en las cercanías de la ciudad de Rivera es más destacada la actividad hortícola. También se cultiva tabaco, arroz y soja.-

Las ciudades más importantes son las capitales de los departamentos: Tacuarembó con 34.000 habitantes y Rivera con 49.000.-

Las rutas principales de acceso a la cuenca son: la ruta 5 de dirección Norte Sur, comunica las ciudades de Rivera y Tacuarembó con la capital del país; la ruta 26 de dirección aproximadamente Este Oeste comunica la cuenca con las rutas y ciudades del litoral Oeste del país y las rutas y ciudades del Este.-

GEOLOGIA

La geología de la mayor parte de la cuenca está constituida por formaciones sedimentarias de edades y litologías variadas, con una isla cristalina en el sector Norte del centro de la cuenca. Las formaciones geológicas presentes, tomadas de Bossi (1966), se describen a continuación en forma general, partiendo de las de edad más antigua a las más recientes:

Predevoniano.

Isla cristalina de Cuñapirú-Vichadero: esencialmente granítica, con bancos ferromagnesianos de dirección Este-Oeste. El material cristalino está fuertemente fracturado.-

Paleozoico.

Permocarbonífero:

San Gregorio-Tres Islas: está formada por depósitos glaciales en la base: tillitas, lutitas várnicas y brechas glaciales sobre areniscas y en la cima areniscas y lutitas carbonosas. Las areniscas en general tienen cemento arcilloso y calcáreo. Aflora en el sector Sur de la cuenca y bordeando la isla cristalina en forma discontinua.-

Sedimentos pelíticos grises: apoyados en concordancia sobre la formación anterior, agrupan tres formaciones en base a las condiciones generales de sedimentación. Afloran en el sector Sur de la cuenca. Las formaciones que los integran son:

- Fraile Muerto: caracterizada por siltitos grises, generalmente piritosos y a veces ricos en Carbonato de Calcio, con estratificación bien definida, cruzada en la base y paralela en la cima.-

- Mangrullo: caracterizada por areniscas claras y arcillas negras en estratificación laminar con gran abundancia de calcáreo. Muchos lechos contienen sustancias bituminosas.-

- Paso Aguilar: constituida por areniscas finas y siltitas finamente estratificadas, con cemento arcilloso. Presenta recristalización secundaria de calcita.-

Yaguari: de litología variada. Partiendo de la base presenta areniscas finas y siltitos rojos intercalados que contienen algunos lechos verdosos de arcilla; lutitas rojas; areniscas de grano fino

e intercalaciones de lutitas; areniscas bastas con estratificación cruzada y niveles conglomerádicos; asociados, aparecen lechos de calizas. El cemento de las areniscas es arcilloso. Se extiende en forma extensa al Norte y al Sur de la isla cristalina.-

Mesozoico.

Triásico:

Tacuarembó: de areniscas, diferencias de acuerdo a su tenacidad en:

- arenisca blanda: con cemento arcilloso en poca proporción, fácilmente disgregable;

- arenisca dura: compacta, resultado de un proceso de litificación: silicificadas o ferrificadas. Está presente generalmente sobre el tipo anterior.-

Se extiende en forma continua y en un área bastante extensa en el sector Oeste de la cuenca.-

Cretáceo:

Formación Arapey: de lavas, presentan la siguiente sucesión de estructuras:

- inferior: roca compacta, con estructura lajosa;

- media: compacta, grano fino, de disyunción columnar;

- superior: vacuolar, con amígdalas de tamaño variable.-

Ocupa todo el extremo Oeste de la cuenca.-

Cenozoico.

Pleistoceno:

Las Arenas: arenas finas a medias con clastos de arena pura y grava. (Prezziozzi et al. 1979).

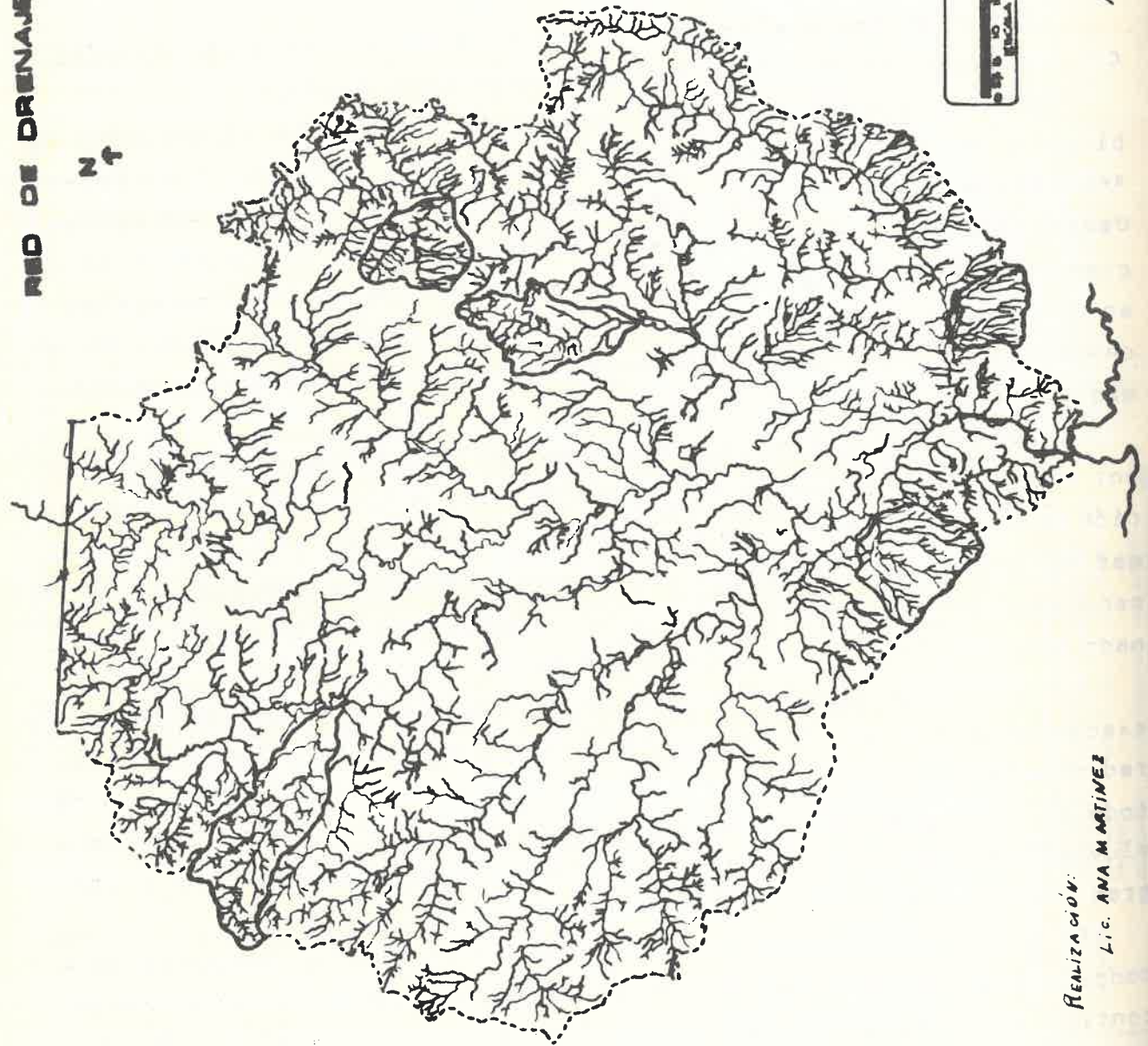
Holoceno.

Sedimentos recientes formados por aluviones, arcillo arenosos, arcillosos y arenales, situados en la llanura aluvial de los ríos. Se extiende en forma continua en los cursos principales, es bastante extensa en el sector Sur y Central.-

CUENCA DEL RIO TACUAREMBO

RIO DE DRENAJE

N ↑



MAPA 4

REALIZACION:
LIC. ANA MARTINEZ

GEOMORFOLOGIA

La cuenca comprende una extensa parte del sector geomorfológico denominado por el prof. Chebataroff (1975) como penillanura sedimentaria. La diversidad de rocas, estructuras y resistencias de las mismas permite realizar la siguiente diferenciación:

Penillanura cristalina.

Desarrollada sobre la isla de basamento cristalino. Determinan sierras rocosas, pero sin dejar de tener en general formas redondeadas; cuando aflora el cristalino son débilmente crestadas.-

La imagen de satélite muestra claramente un cambio en la textura, denotando rugosidad (más clara en la imagen del sector oeste).

Penillanura sedimentaria.

Desarrollada sobre diferentes tipos de sedimentos, determinando formas suaves pero diferentes:

a. Lomadas suaves y fuertes: presentando generalmente valles amplios, desarrollados sobre la Formación Yaguarí y sedimentos pelíticos grises. Se asocian con padrones de drenaje paralelo.

En la imagen de satélite, se ven muy nítidos interfluvios de lomas alargadas, y se aprecia la suavidad de las formas.-

b. Colinas sedimentarias: de cimas redondeadas, desarrolladas sobre las areniscas de la Formación Tacuarembó (cuando no están litificadas) y las Formaciones Las Arenas y San Gregorio-Tres Islas. Están asociados con padrones de drenaje dendríticos.-

Estas formas no son claramente visibles en la imagen, pero donde se encuentran ubicadas, muestran distribución diferente de zonas claras y oscuras.-

c. Serranías y cuchillas achatadas: formas elevadas de cimas planas y generalmente continuas de laderas en la parte superior abruptas y de valles amplios y cóncavos. El sector inferior de estas formas está constituido por areniscas de la Formación Tacuarembó y el sector superior por areniscas litificadas y a veces basalto. Estas formas son claramente visibles en la imagen de satélite en el sector Oeste de la cuenca, tanto si están presentes como serranías y cuchillas, como si constituyen cerros aislados.-

Estas formas desarrollan padrones de drenaje dendríficos, con cuencas generalmente alargadas.-

Zonas relativamente llanas.

Constituyen a veces verdaderas planicies, con sectores anegadizos, se presentan en el sector inferior de los ríos y arroyos principales.-

El padrón de drenaje es sinuoso, y anastomosado.-

La coloración en la imagen de satélite, es de un gris intenso denotando ser muy húmedas.-

Escarpa basáltica.

Es un frente basáltico ubicado al Oeste de la cuenca y constituye el límite Este de la cuesta basáltica.

Diversos arroyos descienden por la escarpa frontal formando quebradas de paredes abruptas y valles encajonados. La acción erosiva de los mismos produce un retroceso continuo de la escarpa hacia el Oeste dejando formas residuales como cuchillas tabulares y serranías hacia el Este y Sudeste de la misma.-

Es claramente visible en ambas bandas de la imagen de satélite.

SUELOS

De acuerdo a la diversidad de las formaciones geológicas y a las formas de relieve, la cuenca reúne una gran variedad de tipos de suelos.-

Las unidades de suelos presentes (tomados de la Carta de Reconocimiento de suelos -DS MAP, 1976) son:

- Cuchilla de Haedo - Paso de los Toros (CH-PT), desarrollados sobre basalto y removilizaciones de la Formación Arapey. Suelos dominantes: litosoles eutricos/subeutricos melánicos.-

- Cuchilla Santa Ana (CSA) desarrollados sobre limolitas del miembro inferior de la Formación Yaguairí. Dominantes: Litosoles eutricos (subeutricos) melánicos.-

- Masoller (Ma) desarrollados sobre la Formación Arapey y removilizaciones limo-arcillosas de la misma. Dominantes: Litosoles eutricos melánicos; vertisoles háplicos y brunosoles eutricos típicos.-

- El Palmito (Epa) desarrollados en sedimentos limo-arcillosos cuaternarios delgados sobre la Formación Yaguairí y Pelíticos grises. Los suelos dominantes en la unidad son: Brunosoles eutricos típicos.-

- Palleros (P11) desarrollados sobre sedimentos limo-arcillosos de la Formación Yaguairí. Dominantes: Brunosoles eutricos típicos y vertisoles háplicos.-

- Cuchilla Caraguatá (Cca) desarrollados sobre limolitas del miembro inferior de la Formación Yaguairí y removilizaciones de la era. Dominantes: Brunosoles eutricos típicos y brunosoles subeutricos luvicos.-

- Pueblo del Barro (PB) desarrollados sobre sedimentos limo-arcillosos de los sedimentos pelíticos grises. Dominantes: Brunosoles eutricos/subeutricos típicos.-

- Santa Clara (SC1) desarrollados sobre migmatitas y granitos, y lavas de la Formación Puerto Gómez. Dominantes: Brunosoles subeutricos háplicos.-

- Sierra Polanco (SP), desarrollados sobre ectinitas, migmatitas y granitos predevonianos. Dominantes: Brunosoles subeutricos háplicos y Brunosoles subeutricos típicos.-

- Arroyo Blanco (AB) desarrollados sobre limolitas del miembro

inferior de la Formación Yaguarí, predominando las removilizaciones de ladera. Accesoriamente sedimentos aluviales recientes. Dominantes: Brunosoles subeutricos típicos/lúvicos.-

- Arroyo Hospital (AH) desarrollados sobre limolitas del miembro inferior de la Formación Yaguarí y removilizaciones en las laderas, accesoriamente sedimentos aluviales recientes. Dominantes: Brunosoles subeutricos luvicos y Brunosoles subeutricos haplicos.-

- Tres Puentes (TP) desarrollados sobre limolitas del miembro inferior de la Formación Yaguarí y sedimentos limo-arcillosos cuaternarios. Dominantes: Brunosoles subeutricos háplicos y brunosoles subeutricos típicos.-

- Rincón de Zamora (RZ) desarrollados sobre sedimentos arenosos-francos y lodolitas sobre limolitas con arena y areniscas de la Formación San Gregorio-Tres Islas. Dominantes: brunosoles subeutricos(eutricos)típicos (háplicos) y brunosoles dístricos luvicos (típicos).-

- Paso Coelho (PC) desarrollados sobre sedimentos limo-arcillosos de los sedimentos pelíticos grises. Dominantes: Vertisoles háplicos.-

- Las Toscas (LT) desarrollados sobre areniscas de la Formación Las Arenas. Dominantes: luvisoles ocricos abrupticos (típicos).-

- Cuchilla de Corrales (CCo), desarrollados sobre sedimentos arenosos de la Formación Las Arenas, sobre el miembro superior de Yaguarí. Dominantes: Luvisoles ocricos típicos/albicos.

- Tacuarembó (Ta), desarrollados sobre areniscas de Tacuarembó y sedimentos arenosos cuaternarios. Dominantes: luvisoles ocricos-(melánicos) abrupticos/típicos.-

- Tres Cerros (TC) desarrollados sobre areniscas de Tacuarembó y sedimentos arenosos cuaternarios, basaltos de Formación Arapey y coluviones. Dominantes: Luvisoles ocricos (melánicos) típicos/albicos y Acrisoles ocricos típicos.-

- Rivera (Rv) desarrollados sobre Formación Tacuarembó y retransportes de la misma. Dominantes: Acrisoles ocricos típicos.-

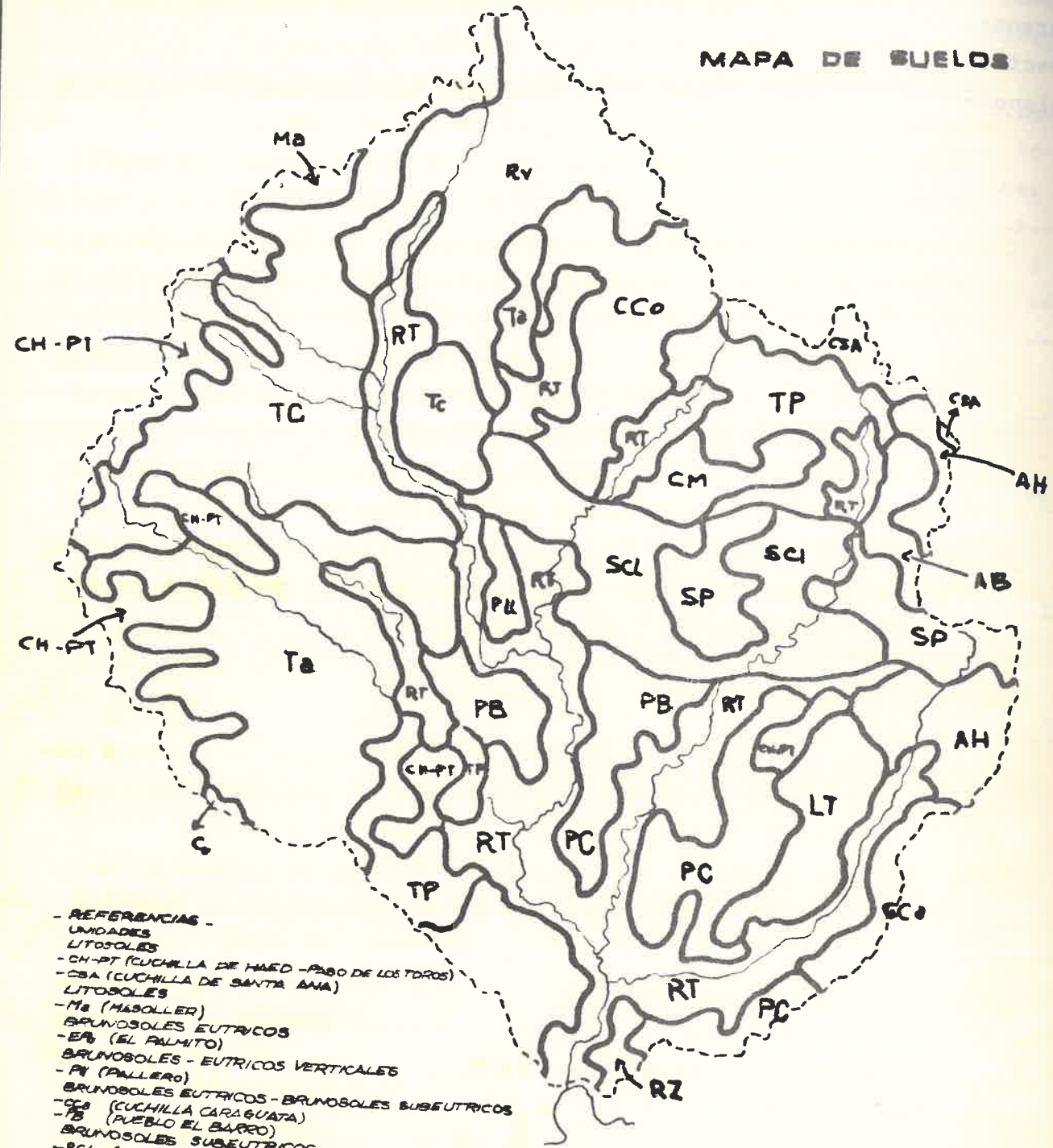
- Cuchilla Mangueras (CM) desarrollados sobre sedimentos arenosos de la Formación Las Arenas, de poco espesor, apoyándose sobre el miembro superior de Yaguarí. Dominantes: Acrisoles ocricos albicos y Argisoles dístricos melánicos abrupticos.-

- Río Tacuarembó (RT) desarrollados sobre sedimentos limosos y

arenosos pertenecientes a la Formación Dolores y Villa Soriano respectivamente. Dominantes: Gleysoles luvicos melánicos típicos y — planosoles dístricos ocricos/umbricos.-

CUENCA DEL RIO TACUAREMBO

MAPA DE SUELOS



- REFERENCIAS -
 UNIDADES
 LITOSOLES
 -CH-PT (CUCHILLA DE HAED - PASO DE LOS TOROS)
 -CSA (CUCHILLA DE SANTA ANA)
 LITOSOLES
 -M₂ (MASOLLER)
 BRUNOSOLES EUTRICOS
 -E₂ (EL PALMITO)
 BRUNOSOLES - EUTRICOS VERTICALES
 -P₁ (PALLERO)
 BRUNOSOLES EUTRICOS - BRUNOSOLES SUBEUTRICOS
 -CS₂ (CUCHILLA CARAGUATA)
 -P₂ (PUEBLO EL BARRO)
 BRUNOSOLES SUBEUTRICOS
 -BCL (SANTA CLARA)
 -SP (SIERRA DE POLANCO)
 -AB (ARROYO BLANCO)
 -TP (TRES PUENTES)
 BRUNOSOLES SUBEUTRICOS - BRUNOSOLES DISTRICOS
 -R₂ (RINCON DE ZAMORA)
 BRUNOSOLES DISTRICOS - LUVISOLES
 -P₂ (PASO COELHO)
 LUVISOLES
 -LT (LAS TOSCAS)
 -CCO (CUCHILLA CORRALES)
 LUVISOLES - ACRISOLES
 -T₂ (TACUAREMBO)
 -T₂ (TRES CERROS)
 ACRISOLES
 -RV (RIVERA)
 ACRISOLES - ARGISOLES
 -CM (CUCHILLA MANGUERA)
 GLEYSOLES - PLANOSOLES
 -RT (RIO TACUAREMBO)



MAPA 5

2.2. PROPUESTA METODOLOGICA

Previamente a la presentación del desarrollo de la metodología propuesta, debemos realizar algunas puntualizaciones:

1. La imprecisión de la documentación utilizada como fuente de información para el trazado de la red de drenaje por:

- poder de resolución de la textura de la imagen de satélite;

- deformación hacia los extremos de la imagen de satélite;
 - deformación por falta de coincidencia en la comparación de la documentación utilizada por pequeñas diferencias de escala.

2. En la metodología propuesta se miden los valores de los elementos de la red hidrográfica proyectados a un plano. Por carecer de valores altimétricos no se toman en cuenta.-

3. Esta es simplemente una propuesta de trabajo, se puede ampliar o modificar si se extiende a toda la cuenca.-

4. Se propone aplicar la metodología, a modo de ensayo, en cuencas donde los valores hallados son representativos de áreas uniformes para poder realizar las comparaciones.-

Jerarquización de cuencas.

La jerarquización de cuencas muestra diferencias en cuanto a relaciones morfométricas y hechos relacionados al régimen hídrico entre cuencas de distinto modelo de padrón de drenaje.-

Para la jerarquización de los cursos de agua de cada cuenca utilizamos el concepto de ordenamiento usado por Horton y Strahler (Strahler, 1964), de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se denominan cursos de primer orden a los cursos de nacimiento, comprenden los de carácter efímero o estacionales y los permanentes, de difícil determinación para nuestro caso, debido a la escala de la fuente de información utilizada.-

- La confluencia de dos cursos de primer orden determina un curso de segundo orden.-

- La confluencia de dos cursos de segundo orden determina un curso de tercer orden, etc.-

El orden de la cuenca está dado por el curso de mayor orden de terminado.-

Este sistema de jerarquización, presenta el inconveniente de -

que la entrada de un tributario de un orden menor no siempre aumenta el orden de la corriente principal.-

Relación de bifurcación. Jerarquizada la red, se determina la relación de bifurcación (R_b), la cual tiene en cuenta el número de corrientes por cada orden ($N_1, N_2 \dots N_k$). Basándose en el hecho de que el número de corrientes de un orden es siempre mayor que el número de corrientes del orden siguiente, Horton (Strahler, 1964) establece la LEY DEL NUMERO DE CORRIENTES, en la que el número de corrientes por cada orden ($N_1, N_2 \dots N_k$) forma una secuencia geométrica inversa con el número de orden.-

La relación de bifurcación está dada por el número de segmentos de un orden al número de segmentos del mayor orden:

$$R_b = \frac{N_u}{N_u + 1} \quad (1)$$

N_u : número de cursos de agua de un orden

También se conoce por el antilogaritmo del coeficiente de regresión:

$$\lg N_u = a - bu \quad (2)$$

$$R_b = \lg^{-1} b \quad (3)$$

u : número de orden

N_u : número de cursos de agua por cada orden

Según Strahler (1964), un valor de 3,5 por ejemplo, indica que el número de los cursos de agua de determinado ordenes 3 veces y media mayor que el número de orden mayor siguiente.-

Para cuencas desarrolladas sobre rocas homogéneas, varía entre 3 y 5, aumenta considerablemente cuando efectos estructurales producen la elongación de la cuenca.-

Relación de longitud. La longitud media de los cursos de agua de un orden dado es mayor que la del orden menor siguiente pero menor que la del orden mayor inmediato. Horton, sostiene que esta relación se mantiene constante en una cuenca, a partir de la cual establece la LEY DE LONGITUD DE CORRIENTES, en la que la longitud media de los segmentos de cada uno de los órdenes sucesivos de una cuen-

ca tiende a aproximarse a una secuencia geométrica inversa en la cual el primer término es el porcentaje de la longitud de los segmentos del primer orden.-

La relación de longitud (R_l) está dado por el antilogaritmo del coeficiente de regresión.

$$\lg \bar{l} = a + bu \quad (4)$$

$$R_l = \lg^{-1} b \quad (5)$$

u : número de orden

\bar{l} : media de las longitudes de las corrientes de un orden determinado.

Comparación de datos relacionados con la jerarquización.

- La comparación de los porcentajes de las longitudes de cada orden muestra diferencias de acuerdo al padrón de drenaje.-

- La distribución de las frecuencias relativas de las longitudes de los cursos de primer orden, segundo orden e intercuenas en histogramas, muestra diferencias entre cuencas con diferentes padrones de drenaje.-

El término intercuenas, defina cursos de agua generalmente de primer orden, que no participan en la jerarquización de la cuenca. Transcurren por áreas aproximadamente triangulares entre límites de cuencas de otros órdenes y que desaguan en cursos de orden superior.-

- Observación del comportamiento de las medias de los ángulos entre cursos de igual orden y con cursos de orden superior.-

Aplicación de índices relacionados con la forma de la cuenca.

El estudio de la forma del contorno de la cuenca es de importancia para conocer la geometría de la red de drenaje, la influencia de factores estructurales en su desarrollo y el régimen de desagüe de la cuenca.-

Relación de forma (R_f): dada por el I.T.U. (1979) como la relación entre la cuenca y el cuadrado de la longitud del curso principal:

$$R_f = \frac{A}{L^2}$$

R_f : relación de forma.

A: área de la cuenca.

L: longitud del curso principal

Valores cercanos a 1 indican mayor redondeamiento, más alejados un mayor control estructural.-

Relación de redondeamiento (R_c): dada por Miller (1964), relaciona el área de la cuenca con el área de un círculo con igual perímetro de la cuenca en estudio.-

$$R_c = \frac{A}{A_c} \quad (7)$$

R_c : relación de redondeamiento.

A: área de la cuenca.

A_c : área de círculo con igual perímetro.

Normalmente los valores tienden a variar entre 0,6 y 0,7 para rocas homogéneas, en cuencas con energía de relieve destacada y elongada tienen valores entre 0,4 y 0,5.-

Relación de elongación (R_e): nos da la máxima extensión de la cuenca, y está dada por la relación entre el diámetro de un círculo de igual área de la cuenca y la longitud máxima de la cuenca a partir de la desembocadura del curso principal. (dada por Schumm, de Strahler). Su determinación indica factores climáticos y geológicos.

Valores cercanos a 1 son propios de áreas de poca energía de relieve, entre 0,1 y 0,6 están asociados a energía de relieve fuerte.

Medidas de textura de drenaje.

Densidad de drenaje. Es la relación entre la longitud de los cursos de agua y la unidad de área.- En nuestro caso tomamos la longitud de todos los cursos de agua de la cuenca y como unidad de área, la superficie de la misma. Se expresa en km/km².-

$$D = \frac{\text{Longitud de cursos de agua}}{\text{Unidad de área}} \quad (8)$$

Este índice es una expresión de parámetros relacionados entre sí y de difícil cuantificación, como por ejemplo: espaciamento de los cursos, porosidad de las rocas, grado de escurrimiento, diacla-

sado del material geológico, etc. Bajas densidades son propias de subsuelos resistentes y permeables, donde es de poco gradiente y bajo. Elevadas densidades aparecen en zonas de materiales del subsuelos impermeables y de gradiente de relieve importante.-

Textura geológica. Dada por Miller (1970), indica la porosidad de las rocas sobre las que corre un río. Está dada por la relación entre la suma de las longitudes de todos los afluentes al curso principal.-

$$T_g = \frac{\text{longitud de afluentes}}{\text{longitud de curso principal}} \quad (9)$$

Número de confluencias por unidad de área. Se relaciona con el patrón de drenaje, en paralelos tendrán menor número de confluencias por unidad de área que para dendríticos.-

Cuantificación de datos.

Para la aplicación de esta metodología, es necesario realizar las siguientes mediciones:

- longitud de cada curso de agua, de acuerdo a la jerarquización realizada;
- longitud del curso principal;
- longitud de afluentes;
- sumatoria de longitudes de cursos de agua;
- número de cursos de agua por cada orden;
- ángulos de confluencia;
- área de la cuenca;
- número de confluencias;
- longitud del perímetro;
- máxima longitud dentro de la cuenca, medida a partir de la desembocadura.

2.3. APLICACION DE LA MORFOMETRIA

Selección de cuencas.

Se seleccionaron cinco cuencas de acuerdo al siguiente orden de criterios para aplicar la morfometría:

- Diferentes tipos de patrón de drenaje: dendríticos, paralelos y meándricos. Se tomaron los dos padrones primeros, en razón de que el tercer tipo no comprendía ninguna cuenca completa. Se trató de -

que el modelo de padrón fuera continuo dentro de cada cuenca. Se seleccionaron cinco cuencas pequeñas.-

- Se consideró que la cuenca se desarrollara en una sola formación geológica.-

- Tipo de suelo: se trató que dentro de la cuenca seleccionada la diversidad de suelos fuera la menor.-

- Forma: se seleccionaron cuencas alargadas, redondeadas y semejantes a un paralelepípedo.-

- De acuerdo a diferencias en energía de relieve, partiendo de las características geomorfológicas, en razón de que no se poseen valores de gradientes de pendientes.-

Cuenca 1. Corresponde a la cuenca del arroyo Laureles, afluente del río Tacuarembó. Comprende un área de 333,5km².-

Se desarrolla sobre las lavas de la Formación Arapey en su mayor parte y areniscas de la Formación Tacuarembó.-

Los suelos dominantes son:

- Luvisoles ocrícos (melánicos) típicos/albícos (Unidad:TC) Ar, de permeabilidad moderadamente lenta, drenaje imperfecto.-

- Acrisoles ocrícos típicos (Unidad: Rv) Ar, ródicos, de permeabilidad lenta y drenaje imperfecto.-

Las formas de relieve son serranías y cuchillas achatadas en las zonas de basalto, con valles encajonados de paredes abruptas. El curso inferior del arroyo transcurre por la Formación Tacuarembó de valles amplios y formas redondeadas. Es la cuenca que presenta la mayor energía de relieve entre las seleccionadas.-

La red de drenaje desarrolla un padrón dendrítico.-

La acción erosiva es importante en la zona de nacientes de la cuenca, con arroyos que descienden rápidamente de la cuesta basáltica por valles estrechos.-

La forma de la cuenca es alargada.-

Los criterios que se tomaron en cuenta para la selección de la cuenca fueron: padrón de drenaje, características geomorfológicas con energía de relieve importante.-

La jerarquización realizada determina que esta es una cuenca de cuarto orden.-

Se realizaron las mediciones y se obtuvieron los siguientes valores:

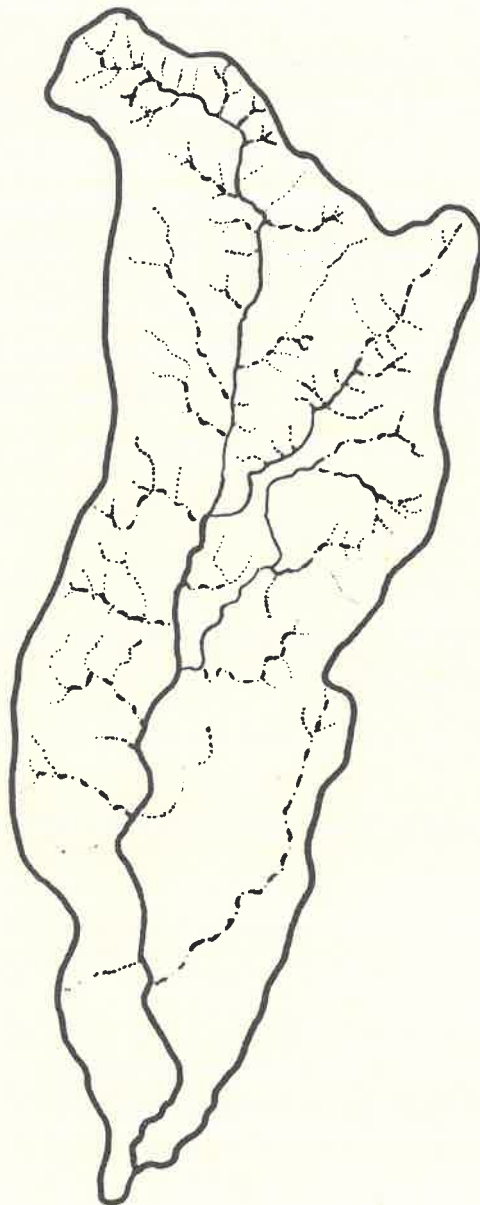
Cuadro No. 1

Datos - Cuenca 1

Longitud Curso Principal	42,5 km
Longitud Afluentes	214,5 km
Area de la cuenca	333,5 km ²
Número de confluencias	134
Perímetro	97,5 km
Longitud máxima	38,5 km

CUENCA 1: Arroyo Laureles

C1



MAPA 6

Cuenca 2. Corresponde a la cuenca del arroyo Carpintería, afluente del arroyo Yaguarí, tiene un área de 199,75 km².-

Se extiende en su totalidad sobre la "Isla Cristalina Cuñapirú -Vichadero" de material granítico.-

Los materiales dominantes (Unidad: SP) son:

- Brunsoles subeútricos háplicos ArFr/Fr(AcFrGv) superficiales de permeabilidad moderada y buen drenaje.-

- Brunsoles subeútricos típicos Fr superficiales/moderadamente profundos, de permeabilidad lenta y drenaje moderado.-

La forma de relieve es de penillanura cristalina.-

La red de drenaje desarrolla un patrón dendrítico, la forma de la cuenca es alargada.-

Los criterios de selección fueron: uniformidad de material geológico y patrón de drenaje.-

La jerarquización realizada determina que es una cuenca de tercer orden.-

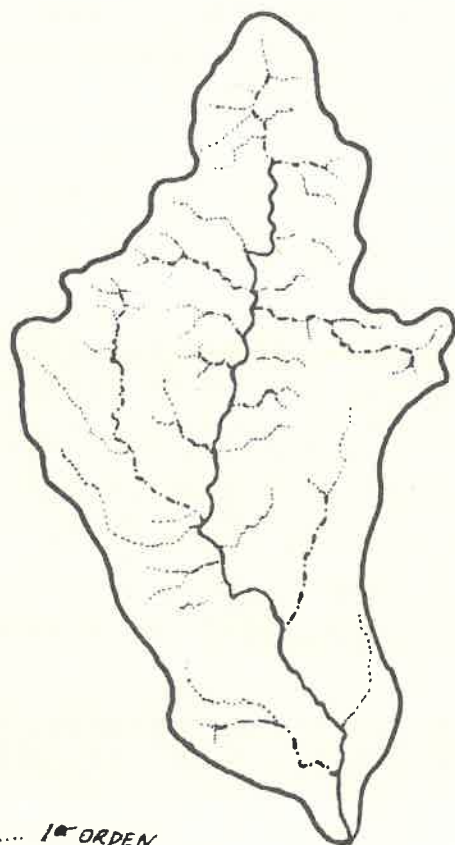
Se realizaron las mediciones y se obtuvieron los datos que se presentan en el cuadro 2 a continuación.-

Cuadro No. 2

Datos - Cuenca 2

Longitud Curso Principal	31,25 km
Longitud de Afluentes	117,075km
Area de la cuenca	199,25 km ²
Número de confluencias	47
Perímetro	72,5 km
Longitud máxima	27,5 km

CUENCA 2: Arroyo Carpintería C₂



.... 1^o ORDEN
 --- 2^o "
 - 3^o "

MAPA 1

Cuenca 3. Corresponde a la cuenca del arroyo de los Barrancos, es afluente del arroyo Caraguatá. Comprende un área de 108,5 km².-

Se extiende sobre sedimentos pelíticos grises (Formaciones -- Fraile Muerto, Mangrullo y Paso Aguiar), en el sector inferior de la cuenca, sobre formaciones actuales.-

Los suelos dominantes son:

- Vertisoles háplicos (Unidad PC) LAc, de permeabilidad lenta y drenaje moderado a pobre.-

- Gleysoles luvicos melánicos típicos (Unidad RT) Fr parácui--cos, de permeabilidad muy lenta y drenaje pobre.-

- Planosoles distrícos ocrícos/umbrícos (Unidad RT) Ar parácui--cos/aéricos (hidromórficos) de permeabilidad lenta a moderadamente lenta y drenaje imperfecto.-

La forma de relieve es de lomadas suaves y fuertes, se encuentra situada en el sector inferior de la cuenca, por lo que la energía de relieve es poco importante.-

Desarrolla un padrón de drenaje paralelo y una forma de cuenca semejante a un paralelepípedo. Los cursos de nacientes son generalmente extensos.-

Los criterios más importantes para la selección de la cuenca - fueron: litología, padrón de drenaje, forma de la cuenca y energía de relieve.-

La jerarquización realizada determinó que esta es una cuenca - de cuarto orden.-

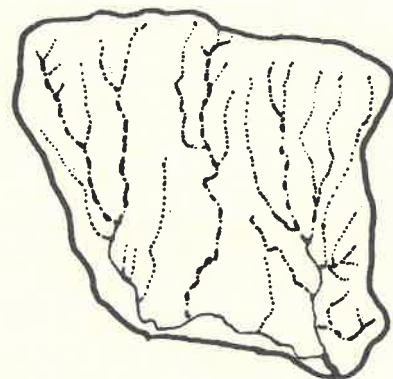
Los datos obtenidos luego de aplicar la metodología se presentan en el cuadro No. 3.-

Cuadro No. 3

Datos - Cuenca 3

Longitud Curso Principal	17,5 km
Longitud de Afluentes	86,375 km
Área de la Cuenca	108,5 km ²
Número de Confluencias	30
Perímetro	55 km
Longitud máxima	15,5 km

CUENCA 3: Arroyo de los Barrancos
C₃

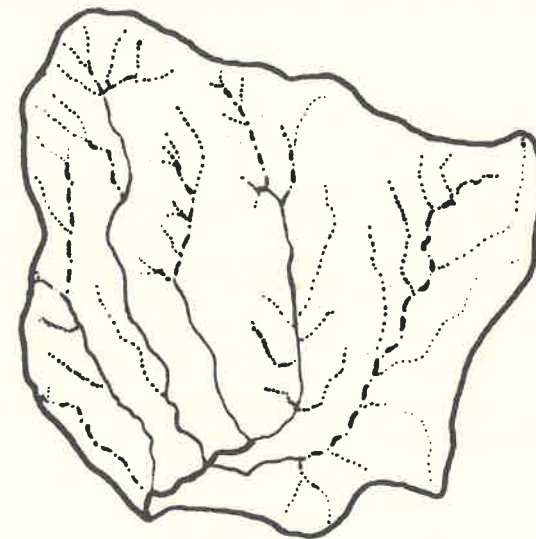


1^o ORDEN
2^o ORDEN
3^o ORDEN
4^o ORDEN

MAPA 8

CUENCA 4: Arroyo del Sauce

C₄



1^o ORDEN
2^o ORDEN
3^o ORDEN
4^o ORDEN

MAPA 9

Cuenca 4. Corresponde a la cuenca del arroyo del Sauce afluente -- del río Tacuarembó Chico. Tiene un área de 218,25km².-

Se desarrolla sobre el Grupo de Sedimentos Pelíticos Grises, - los bordes de la cuenca en la Formación San Gregorio-Tres Islas y el sector inferior en depósitos actuales.-

Los suelos dominantes (Unidad: RZ) son:

- Brunosoles subeutricos (eutricos) típicos (haplicos) Fr/ArAc (vérticos), (ródicos) de permeabilidad lenta y drenaje moderado.-

- Brunosoles distrícos luvícos (típicos) Ar/ArFr/Fr(parácuícos) (vérticos), de permeabilidad lenta y drenaje moderado a imperfecto.-

Las condiciones de energía de relieve poco importante, de padrón de drenaje paralelo, de forma de cuenca y litología semejantes a la cuenca número 3, fueron los factores por los que se seleccionó a efectos de comparación.-

La jerarquización realizada determinó que esta cuenca es de -- cuarto orden.-

Quadro No. 4

Datos - Cuenca 4

Longitud de Curso Principal	17,5	km
Longitud de afluentes	121,125	km
Area de la cuenca	218,25	km ²
Número de confluencias	49	
Perímetro	60	km
Longitud máxima	18	km

CUENCA 5: Arroyo del Caillara C5



--- 1º ORDEN
- 2º ORDEN
- 3º ORDEN
- 4º ORDEN

MAPA 10

Cuenca 5. Corresponde a la cuenca del arroyo del Caillava afluente del arroyo Yaguarí. Tiene un área de 162.625km². Se desarrolla sobre la Formación Yaguarí.

Los suelos dominantes son:

- Acrisoles ocrícos albicos (Unidad CM) Ar de permeabilidad moderada y drenaje imperfecto.-

- Argisoles distrícos melánicos abruptícos (Unidad CM) FrAr, -- permeabilidad moderadamente lenta y drenaje moderado a imperfecto.

- El sector inferior de la cuenca se desarrolla sobre la unidad Río Tacuarembó ya descrita para la cuenca 3.-

Las formas de relieve son de lomadas suaves y fuertes. El padrón de drenaje de la cuenca es dendrítico, con paralelismo en algunos de los cursos secundarios. La forma de la cuenca es redondeada.-

Se realizaron mediciones, las que arrojaron los siguientes valores:

Cuadro No. 5

Datos - Cuenca No. 5

Longitud de Curso Principal	19,25 km
Longitud de Afluentes	149,125 km
Area de la cuenca	162,625 km ²
Número de confluencias	58
Perímetro	51,25 km
Longitud máxima	17,75 km

Análisis y comparación de los valores hallados.

La reunión de los valores hallados en cuadros y la representación gráfica de algunos de ellos, permiten hacer algunas observaciones, sin permitir aún obtener conclusiones en razón del número de cuencas seleccionadas para estudio.-

Relación de bifurcación. Se usaron las fórmulas 2 y 3.-

Cuadro No. 6

C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
6.81	8.89	3.24	3.72	4.29

Relación de Bifurcación

C_k: cuenca No. ...

Las cuencas 3, 4 y 5, desarrolladas en material sedimentario -- homogéneo, tienen una relación de bifurcación entre 3 y 5, valores que indican ausencia de factores estructurales que afecten el padrón de drenaje.-

La cuenca 1, desarrollada en su mayor parte en basalto, con un diaclasado importante, tiene un valor de 6,81.-

La cuenca 2, desarrollada sobre material cristalino, donde el factor estructural es muy importante tiene el mayor valor: 8.89.-

En la figura 1 presentamos las rectas de cada una de las cuencas. La representación gráfica muestra un paralelismo aproximado en las cuencas de R_b entre 3 y 5, correspondientes a C₃, C₄ y C₅.-

La representación gráfica de las rectas de las C₁ y C₂ de valores más altos, 6.81 y 8.89 respectivamente, muestran también un paralelismo entre sí, ambas de formas alargadas de contorno y con factores estructurales influyendo en el desarrollo del padrón de drenaje.-

Relación de longitud. Se usaron las fórmulas 4 y 5. (Ver cuadro No. 7 y Figura No. 2).-

Se destacan las rectas correspondientes a las cuencas 1 y 5, - el valor de la media de la longitud de los cursos aumenta rápidamente con el número de orden.-

El comportamiento de las rectas de las cuencas 3 y 4 es diferen

te de las anteriores.-

Se observa que la relación de longitud de la cuenca número 2 - es menor a las demás.-

Cuadro No. 7

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
0.49	0.07	0.13	0.17	0.29

Relación de longitud

C_k : cuenca número ...

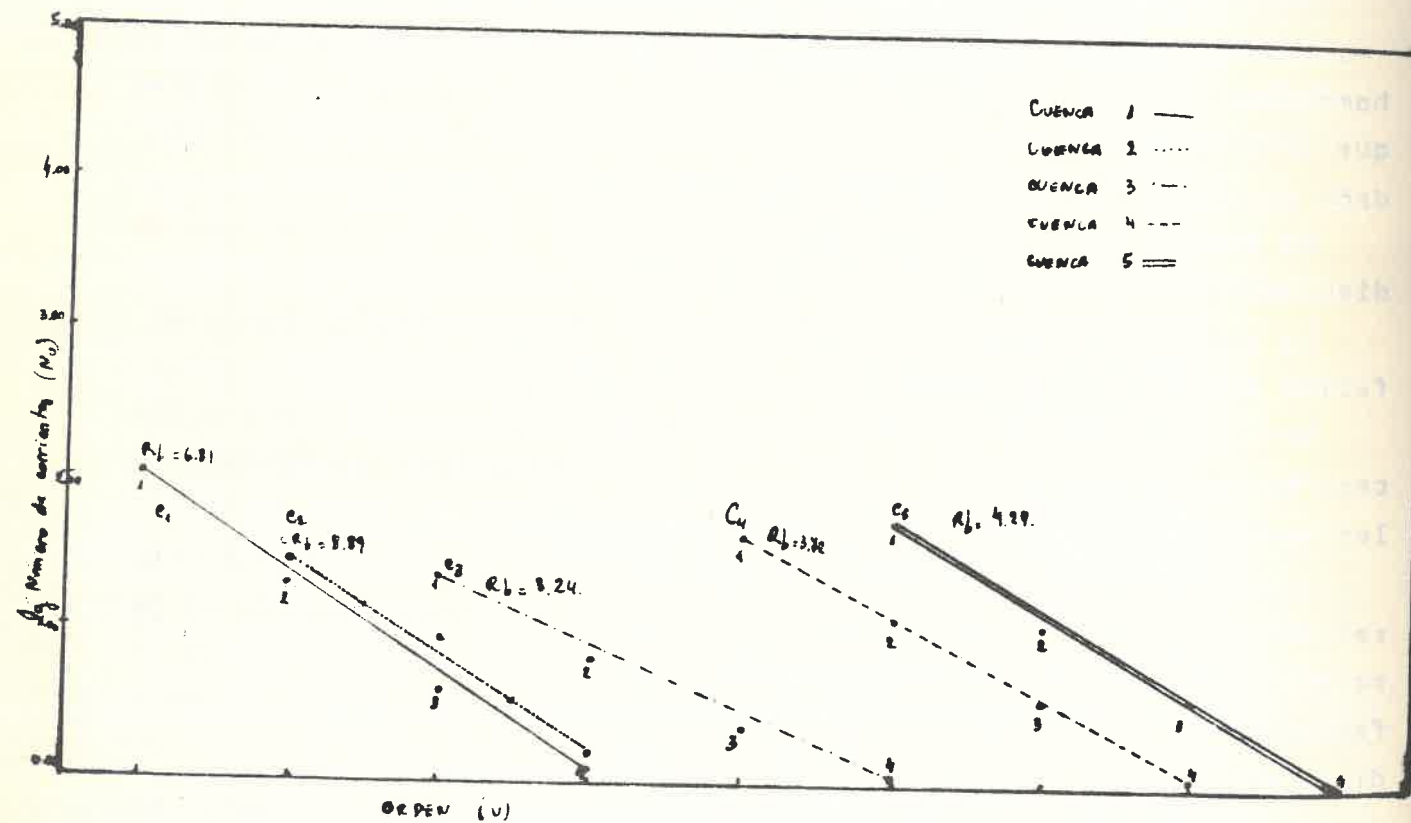


Fig. 1 - Relación de bifurcación

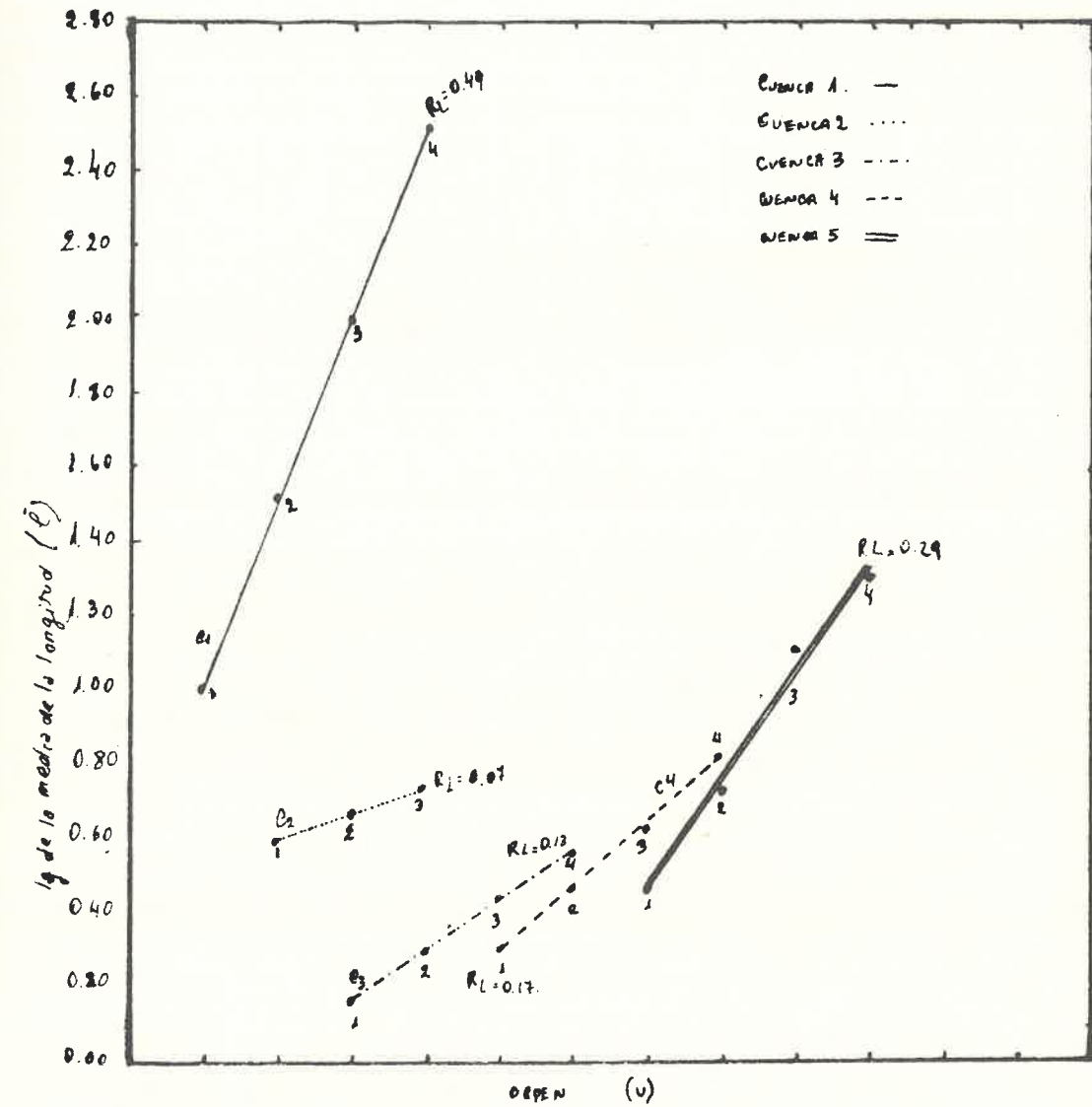


Fig. 2 - Relación de Longitud.

Longitudes de cursos de agua.

Cuadro No. 8

Orden	Cuenca 1			Cuenca 2			Cuenca 3			Cuenca 4			Cuenca 5		
	Km	%	\bar{l}	Km	%	\bar{l}	Km	%	\bar{l}	Km	%	\bar{l}	Km	%	\bar{l}
1 ^{er}	122	51	1	53,37	36	1,43	64,37	62	2,14	84,37	61	1,76	74,87	60	1,22
2 ^o	53,75	23	2	67,45	45	2,56	25	2,4	4,16	35,5	26	3,23	66,75	13	3,3
3 ^{er}	37,5	16	12,5	27,5	19	2,75	13,75	13	4,58	13,75	10	6,875	15,75	4	3,94
4 ^o	23,75	10	23,75	-	-	-	0,75	1	0,75	5	3	5	11	1	11
Total	237	100		148,32	100		103,87	100		38,62	100		168,97	100	

Se destacan las cuencas:

- No. 1 por: - mayor número de corrientes de primer orden;
 - menor media de longitud de corrientes de primer orden;
 - mayor longitud del curso de cuarto orden.-
- Es de importancia aquí la forma de la cuenca y el patrón de drenaje.-

- No. 3 por: - mayor porcentaje de longitud de los cursos de primer orden en relación a los demás.-
 - mayor media de la longitud de los cursos de primer orden;
 - tiene el curso de cuarto orden de menor longitud.

En la cuenca No. 4 se observan valores aproximados por tener igual patrón de drenaje.-

Distribución de frecuencias relativas de los cursos de primer y segundo orden. En las figuras 3, 4, 5, 6, y 7 correspondientes a cada una de las cuencas, se presentan agrupadas en clases las frecuencias relativas, así como también las de cada uno de los valores de las longitudes halladas.-

Se aclara que por la escala de la fuente de información utilizada (1:250.000) y el valor menor utilizado al realizar la medición (1mm), los valores de los cursos de agua se dan en fracciones de 0,125km.-

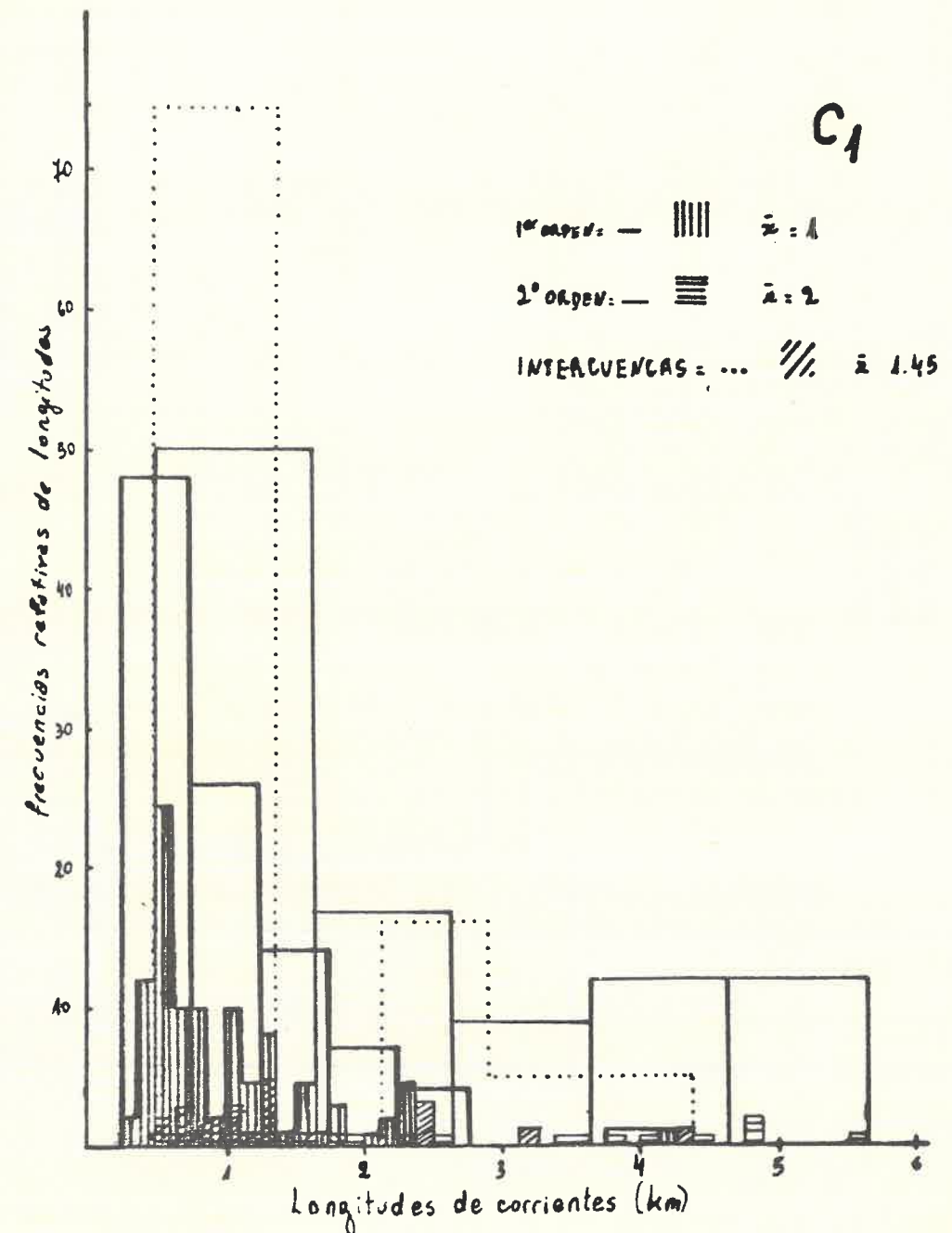


Figura 3. Distribución de frecuencias relativas de cursos de primer orden, segundo orden e intercuencas. (cuenca 1)

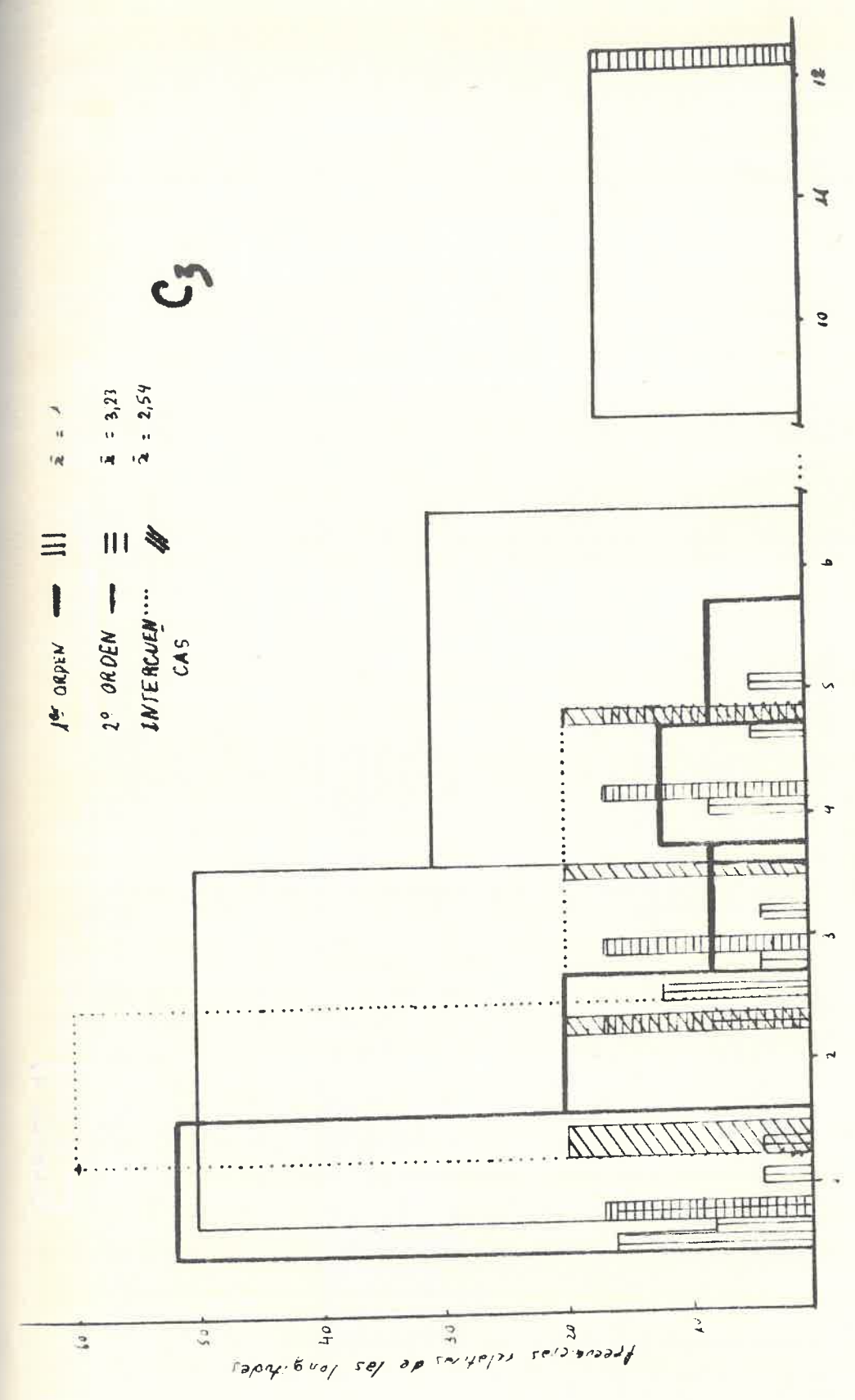
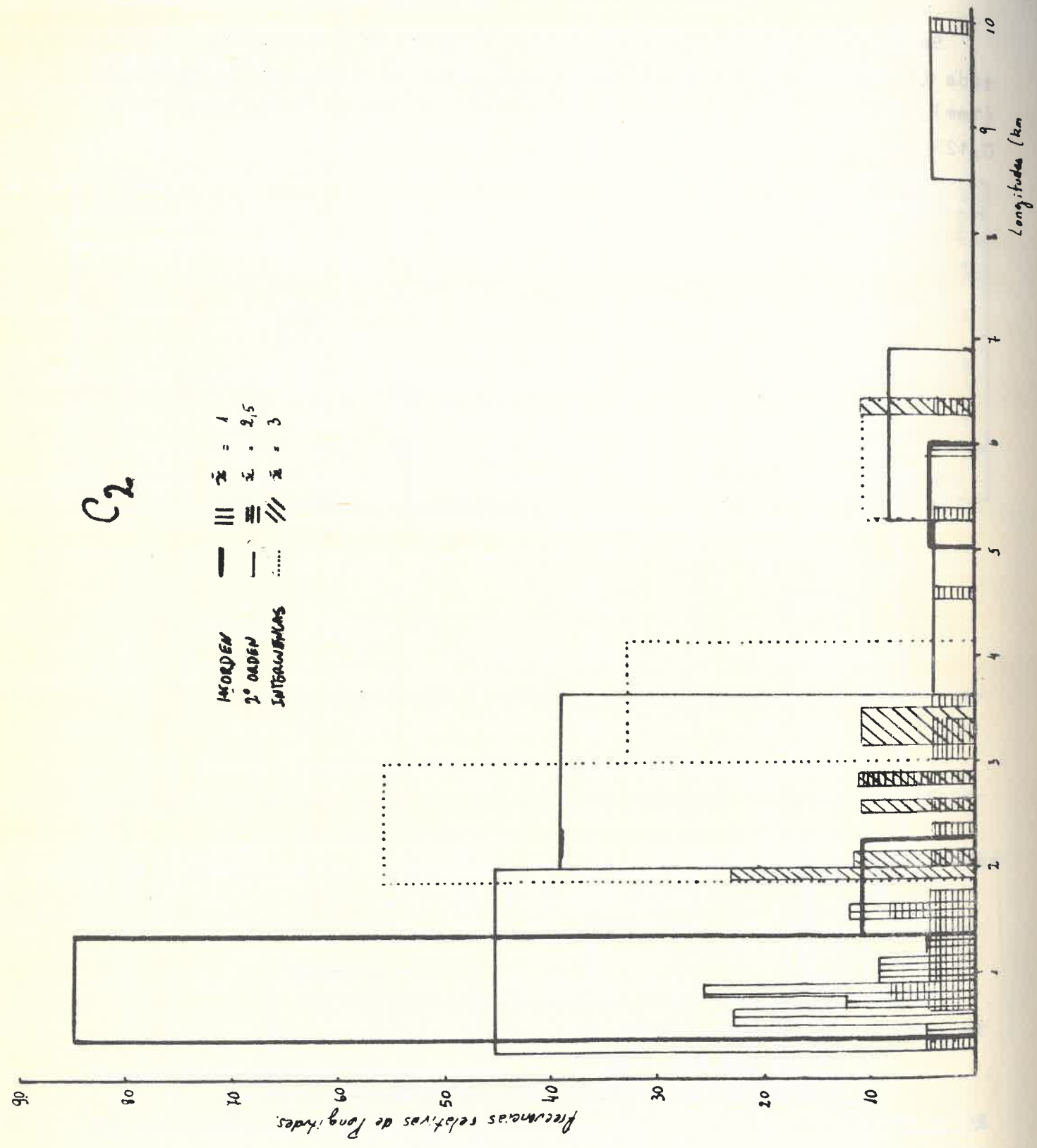


Figura 5. Distribución de frecuencias relativas de longitudes de cursos de primer orden, segundo orden e intercúvas. (cuena 3)

C4

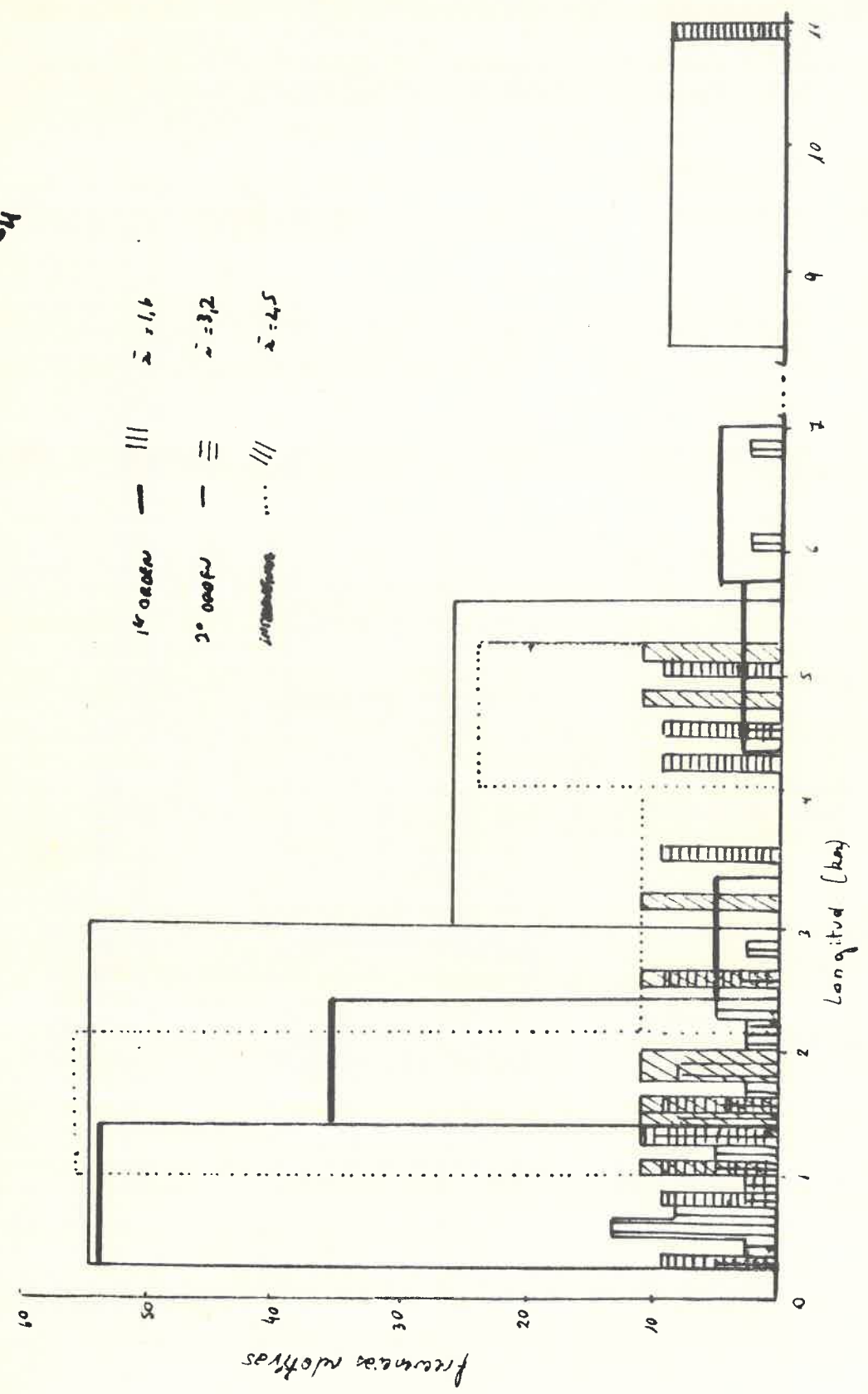


Figura 6. Distribución de frecuencias relativas de longitudes de cursos de primer orden, segundo orden e intercuencas. (Cuenca 4)

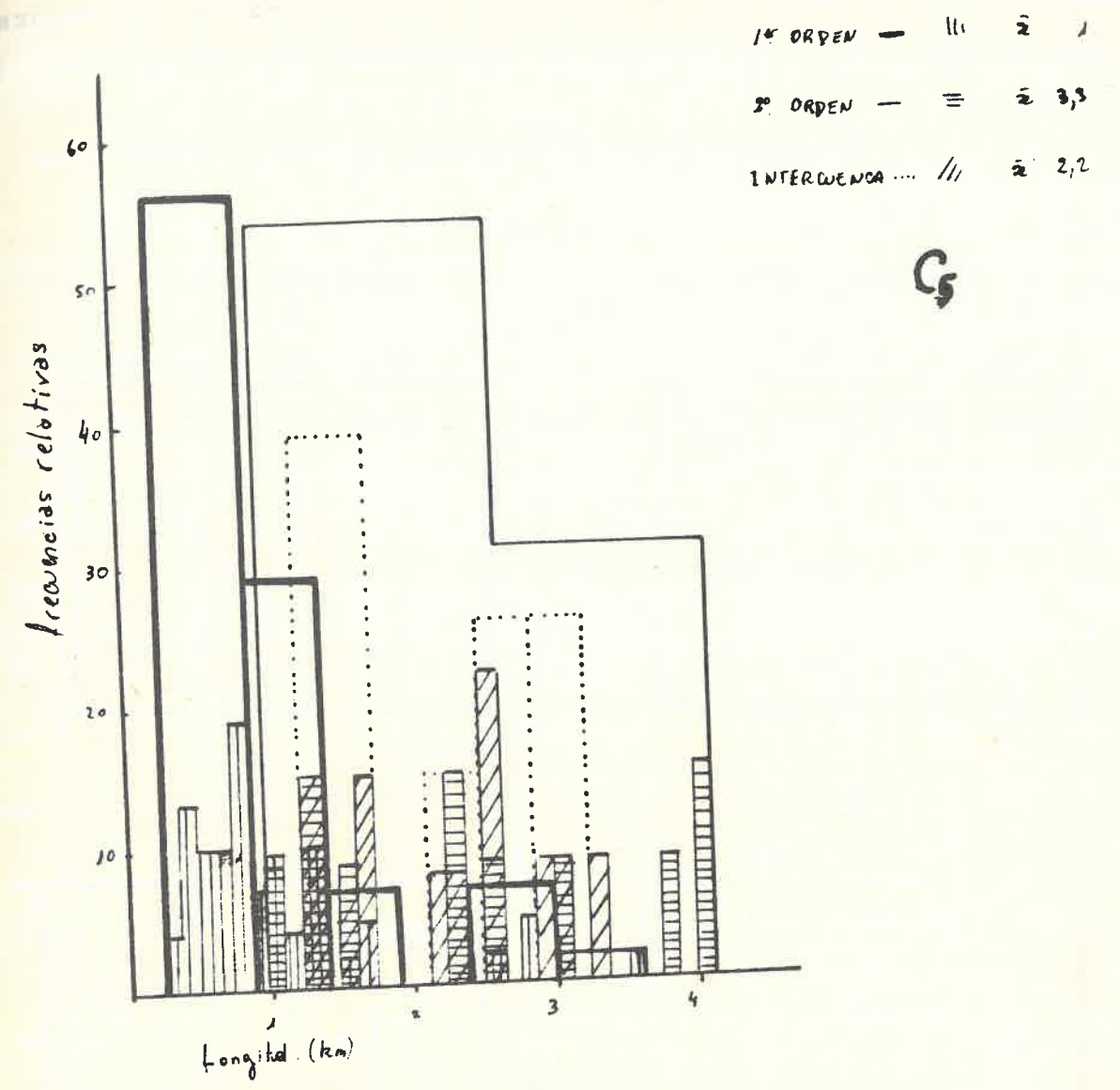


Figura 7. Distribución de las frecuencias relativas de las longitudes de cursos de primer orden, segundo orden e intercuencas. (cuenca 5)

Comportamiento de ángulos. Es diferente en cada una de las cuencas.
En las cuencas 3 y 4, se observa un comportamiento semejante.

Cuadro No. 9

Comportamiento de ángulos

Cuenca 1

ORDENES

	1er.	2o.	3er.	4o.
1er.	68°52'48	84°18'24	82°27'36	94°
2o.		84°48'	78°12'	67°24'
3er.			54°30'	60°
4o.				-

Cuenca 2

ORDENES

	1er.	2o.	3er.	4o.
1er.	74°52'48	95°21'	111°36'	
2o.		72°	71°	
3er.				
4o.				

Cuenca 3

ORDENES

	1er.	2o.	3er.	4o.
1er.	49°	90°	76°12'	82°
2o.		53°99'48	113°	110°
3er.			117°	-
4o.				

Cuenca 4

ORDENES

	1er.	2o.	3er.	4o.
1er.	61°43'12	68°22'12	76°54'	-
2o.		71°15'	55°19'48	70°
3er.			55°	-
4o.				

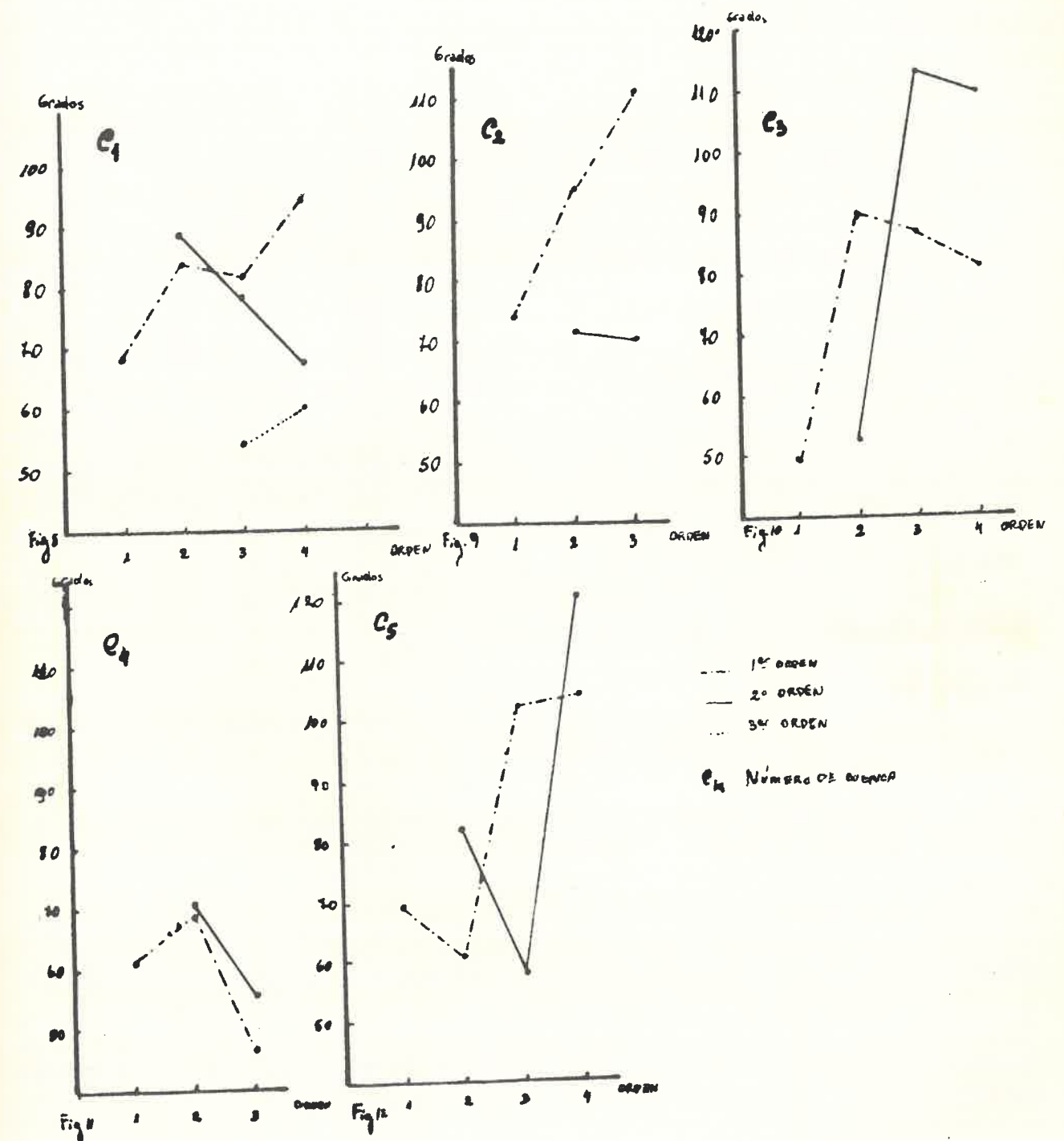
Cuenca 5

ORDENES

	1er.	2o.	3er.	4o.
1er.	69°	69°7'12	102°14'	109°7'12
2o.		82°	58°12'	-
3er.			100°	-
4o.				

-Representación gráfica del comportamiento de ángulos

C_k: número de cuenca



Relaciones indicadoras de forma: (Se utilizaron las fórmulas 6,7)

Cuadro 10

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Relación de forma (R _f)	0.19	0.2	0.35	0.71	0.44
Relac.de redondeamiento (R _c)	0.44	0.47	0.45	0.76	0.78
Relac. de elongación(R _e)	0.31	0.58	0.76	0.93	0.81

La cuenca número 1 reúne los menores valores, en cuanto a relación de forma y de redondeamiento, indicando claramente que la forma de la cuenca es alargada. En cuanto a la relación de elongación el valor 0,31 está asociado con energía de relieve importante.-

Las cuencas 4 y 5 reúnen los mayores valores de relación de forma, indicando una tendencia a la forma redondeada y homogeneidad de textura de material geológico. En cuanto a la elongación, los mayores valores hallados, cercanos a 1.0 correspondientes a las cuencas 4 y 5 indican zonas de relieve muy bajo.-

Número de confluencias por unidad de área.

Cuadro No. 11

C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
0.4	0.24	0.27	0.22	0.36

El menor valor corresponde a la cuenca número 4 de padrón de drenaje paralelo. El valor máximo corresponde a la cuenca número 1 de padrón dendrítico. Observando los demás valores, no resultan diferencias claras, por ejemplo la cuenca 3 de padrón de drenaje paralelo muestra un valor algo mayor que la cuenca 2.-

Indices de textura de drenaje. Se usaron las fórmulas Nos. 8. y 9.-

Los valores hallados se presentan en el cuadro 12.-

Cuadro No. 12.

Indices de textura de drenaje

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Densidad de drenaje (km/km ²)	1.22	0.77	1.04	0.96	1.02
Textura geológica	7.99	3.88	5.47	9.71	7.65

El menor valor de densidad de drenaje, corresponde a la cuenca 2, con material geológico resistente, con importante diaclasado y subsuelos con drenaje bueno a moderado. La energía de relieve no es importante. El mayor valor de densidad de drenaje corresponde a la cuenca No. 1, con material subsuperficial de permeabilidad lenta y drenaje imperfecto; la energía de relieve es importante.-

Las cuencas 3,4 y 5 presentan valores intermedios.-

El menor valor hallado de textura geológica corresponde a la cuenca 2, desarrollada sobre material geológico cristalino, drenaje y permeabilidad buena a moderada. El mayor valor corresponde a la cuenca 4 sobre material geológico fino de permeabilidad lenta y drenaje moderado.

Se destaca que los valores hallados para textura de drenaje en cuencas desarrolladas sobre material geológico sedimentario son marcadamente superiores a los hallados para la cuenca 2.-

2.4. COMPROBACION DE LA HIPOTESIS

Para la comprobación de la hipótesis planteada, se aplicó una prueba t en los valores hallados que pueden, por el número de individuos, ser tratados estadísticamente. En primer lugar se tomaron las medias de las longitudes de los cursos de cada cuenca, en segundo lugar, las medias de los ángulos de confluencia.-

Se fijó un nivel de significación del 10%, se hallaron las regiones críticas correspondientes a una distribución t-student, ya que la distribución en el muestreo de la estadística "diferencia de medias" para una distribución normal y la de la varianza muestral $(S_T)^2$ tiene una distribución χ^2 .-

La prueba fue hecha a dos ramas, teniendo en cuenta que la formulación de la hipótesis es la siguiente:

$$H_0) \mu_{\text{O}} = \mu_{\text{A}}$$

$$H_1) \mu_{\text{O}} \neq \mu_{\text{A}}$$

Como la hipótesis de alternativa es compuesta, la región crítica óptima según el criterio de Neyman-Pearson debe ser hecha a dos ramas, por lo que queda representada de la siguiente manera:

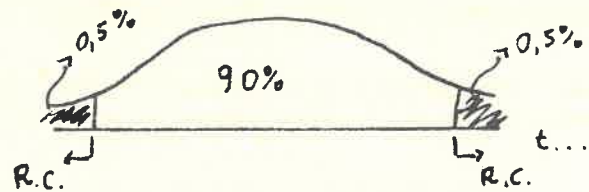


Figura 13.

Se contruyó la expresión t para cada una de las diferencias posibles de acuerdo a pares asociados, para cada caso de diferencias. - Se compararon las medias de las longitudes de cada orden de una cuenca con los correlativos de otra.-

Los resultados obtenidos se muestran en la figura No. 14 a continuación.- (Ver Anexo I)



	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁				Δ	*
C ₂					
C ₃					
C ₄					
C ₅	*				

Figura 14. Resultado de aplicación de prueba t entre medias de longitudes de cursos de agua.

C_k número de cuenca

Δ existen diferencias significativas

* los valores hallados se encuentran cercanos al margen de rechazo o de diferencias significativas.

- Separando los valores de las medias correspondientes a las cuencas de primer orden y de intercuenas, los valores que se hallaron quedan así representados:



	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁			*		*
C ₂					
C ₃				Δ	
C ₄					
C ₅					

Figura No. 15. Resultado de la aplicación de prueba t entre medias de cursos de agua incluyendo in tercuenas.

C_k Número de cuenca.

Δ existen diferencias significativas

* los valores hallados se encuentran cercanos al margen de rechazo o de diferencias significativas.

Se observa que existen diferencias significativas entre los valores hallados para las cuencas 1 y 4, la primera de padrón dendrítico y la segunda de padrón paralelo.-

Los valores hallados cercanos al margen rechazo o de diferencias significativas corresponden solamente a las cuencas 3 y 5 (de padrón dendrítico).-

- Se compararon las medias de los ángulos de confluencia para cada una de las cuencas con los de otra y se realizaron todas las compa-

raciones posibles.-

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁		*		Δ	
C ₂	Δ		*		
C ₃		*		Δ	
C ₄	Δ		*		Δ
C ₅				Δ	

Figura No. 16. Resultados de prueba t aplicada a medias de ángulos de confluencias.

C_k número de cuenca.

Δ diferencias significativas

* valores cercanos al margen de diferencias.

En esta prueba se halló el mayor número de diferencias.

Se dan diferencias significativas :

- entre las cuencas 1 y 4 y viceversa; la primera de padrón de drenaje dendrítico, con energía de relieve importante y la segunda de padrón paralelo, con energía de relieve muy escasa.-

- entre la cuenca 4 y la cuenca 5, de padrón dendrítico y con poca energía de relieve.-

Se encontraron diferencias al comparar:

- la cuenca 2 con la 1, al comparar la 1 con la 2, los valores hallados se acercan al margen de rechazo; ambos con padrones de drenaje y forma de cuenca semejantes, pero desarrolladas sobre material geológico y con energía de relieve diferentes.-

- la cuenca 4 con la 3; los valores se encuentran cercanos al

margen de error al comparar la cuenca 3 con la 4.-

Se destaca que estas cuencas fueron seleccionadas a efectos de comparación por tener padrones de drenaje semejantes. Al contrario de lo que se esperaba se hallaron diferencias.-

Al comparar la cuenca 2 con la 3 y la 3 con la 2 se hallaron valores cercanos al margen de rechazo.-

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La fuente de información utilizada para realizar este estudio, imágenes de satélite LANDSAT a escala 1:250.000, permitirá aplicar una morfometría a partir de datos obtenidos de la red de drenaje de la cuenca del río Tacuarembó proyectadas en un plano horizontal.

En razón de que el número de cuencas tomadas como ejemplo (5) es pequeño, no se realiza una clasificación de cuencas, simplemente se observan comportamientos diferentes.-

La cuantificación y el tratamiento de datos realizados, muestra diferencias entre cuencas de distinto padrón de drenaje, manifestadas en: comportamiento de ángulos de confluencias, textura de drenaje, grado de bifurcación y relaciones de forma, debidos a diferentes litologías, textura y grado de diferenciación de suelos, y a energía de relieve.-

Como recomendaciones se dan:

- Complementar el estudio con el uso de fotos aéreas y fotointerpretación.-
- Realizar una ampliación bibliográfica para buscar otros parámetros que permitan una diferenciación más clara para poder caracterizar cuencas para el estudio del régimen hídrico.-
- Aplicar la metodología a un mayor número de cuencas para realizar una clasificación de las mismas.-
- Realizar mediciones de los desniveles de las cuencas para completar la morfometría propuesta.-
- Obtener valores de precipitaciones en cuencas determinadas para hallar la curva del comportamiento de descargas.-

4. BIBLIOGRAFIA

- Asti, Vera Armando (1973), Metodología de la investigación, Ed. Kapelusz, Bs.As.
- Bonilla, José A. (1971), Elementos de Estadística, Ed. Comunidad - del Sur, Uruguay.
- Bossi, Jorge (1966), Geología del Uruguay, Ed. Universidad de la - República, Uruguay
- Chorley, Richard J. (Editor)(1971), Introduction to Physical Hydrology. Ed. University Paperbacks, London
- Chorley, R.J. (Editor) (1975), Modelos físicos e de informação em Geografia. Tr. Viriato de Medeiros, Arnaldo, Ed. da Universidade. Rio de Janeiro
- Dir.de Suelos(1979), Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, tomo III, Ed.MAP Uruguay
- Derruau, Max (1971), Geomorfología, Ed. Ariel, Barcelona
- Licio, Beatriz y otros (1990). Instrumentación operativa a nivel - territorial para la orientación del uso y control de los recursos naturales. ITU, CTM. Ed, Fac.Arquitectura
- López Cadenas, F. y otro (1969) Aplicación de la fotografía aérea a los proyectos de restauración hidrológica forestal, Ed. Min-Agricultura, Madrid.
- Miller, Austin (1970), La piel de la tierra, Ed. Alhambra S.A., España.
- Mood, Alexander M. y otro (1979), Introducción a la teoría de la - estadística. Ed. Aguilar, España
- Prezziozzi y otros (1979) Carta geoestructural del Uruguay, Ed. I. Geológico E. Terra Arcena, Uruguay
- Strahler, A.M.(1964), Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks; (en In Chow, V.T., Editor, Handbook of - Applied Hydrology) Mc Graw Hill, New York
- Quagliotti, Bernardo y otros (1976) Cuenca del río Tacuarembó. Plan de Desarrollo. Informe preliminar.
- Vegas, Paul (1973), Extracting land use information from the Extracting Resources Technology Satellite data by conventional interpretation methods, Ed. Lyndon B. Johnson Space Center.
- - (1977) Resource sensing from space: Projects for developing - countries, Ed. National Academy of Sciences, Washington D.C.

ANEXO I- Resultados de prueba t.

Aplicada a longitudes de cursos de agua:

C_1-C_2	C_2-C_1	C_3-C_1	C_4-C_1	C_5-C_1
$\bar{d}: 1.94$	$\bar{d}: 1.94$	$\bar{d}: -6.9$	$\bar{d}: -5.60$	$\bar{d}: -4.95$
$S_{\bar{d}}: 9.0339$	$S_{\bar{d}}: 4.965$	$S_{\bar{d}}: -4.965$	$S_{\bar{d}}: 4.65$	$S_{\bar{d}}: 3.41$
$t: 0.241$	$t: -0.24$	$t: -1.19$	$t: -1.204$	$t: -1.45$
C_1-C_3	C_2-C_3	C_3-C_2	C_4-C_2	C_5-C_2
$\bar{d}: 6.905$	$\bar{d}: 4.965$	$\bar{d}: -4.965$	$\bar{d}: -3.656$	$\bar{d}: -1.7275$
$S_{\bar{d}}: 5.924$	$S_{\bar{d}}: 5.99$	$S_{\bar{d}}: 5.999$	$S_{\bar{d}}: 5.755$	$S_{\bar{d}}: 7.629$
$t: 1.195$	$t: 0.929$	$t: -0.995$	$t: -0.635$	$t: -0.226$
C_1-C_4	C_2-C_4	C_3-C_4	C_4-C_3	C_5-C_3
$\bar{d}: 5.596$	$\bar{d}: 3.656$	$\bar{d}: -1.309$	$\bar{d}: 1.31$	$\bar{d}: 1.965$
$S_{\bar{d}}: 0.029$	$S_{\bar{d}}: 5.755$	$S_{\bar{d}}: 1.207$	$S_{\bar{d}}: 1.21$	$S_{\bar{d}}: 2.76$
$t: 4.656$	$t: 0.635$	$t: -1.09$	$t: 1.09$	$t: 0.712$
C_1-C_5	C_2-C_5	C_3-C_5	C_4-C_5	C_5-C_4
$\bar{d}: 4.947$	$\bar{d}: 3.01$	$\bar{d}: -1.9575$	$\bar{d}: -0.656$	$\bar{d}: 0.656$
$S_{\bar{d}}: 3.411$	$S_{\bar{d}}: 7.306$	$S_{\bar{d}}: 2.76$	$S_{\bar{d}}: 1.897$	$S_{\bar{d}}: 1.897$
$t: 1.536$	$t: 0.412$	$t: -0.71$	$t: -0.346$	$t: 0.346$

Resultados de prueba t aplicada a longitudes de cursos de agua, teniendo en cuenta como orden independiente los cursos de intercuenas:

C_1-C_2	C_2-C_1	C_2-C_1	C_4-C_1	C_5-C_1
$\bar{d}: 1.329$	$\bar{d}: -1.329$	$\bar{d}: -5.297$	$\bar{d}: 5.45$	$\bar{d}: -3.86$
$S_{\bar{d}}: 6.257$	$S_{\bar{d}}: 6.2569$	$S_{\bar{d}}: 4.799$	$S_{\bar{d}}: 6.20$	$S_{\bar{d}}: 2.86$
$t: 0.212$	$t: -0.212$	$t: -1.106$	$t: 0.79$	$t: -1.35$
C_1-C_3	C_2-C_3	C_2-C_2	C_4-C_2	C_5-C_2
$\bar{d}: 5.297$	$\bar{d}: 7.969$	$\bar{d}: -3.969$	$\bar{d}: 2.97$	$\bar{d}: -2.20$
$S_{\bar{d}}: 4.911$	$S_{\bar{d}}: 4.749$	$S_{\bar{d}}: 4.75$	$S_{\bar{d}}: 5.40$	$S_{\bar{d}}: 5.71$
$t: 1.1$	$t: 0.936$	$t: -0.94$	$t: 0.55$	$t: -0.39$
C_1-C_4	C_2-C_4	C_3-C_4	C_4-C_2	C_5-C_3
$\bar{d}: 4.31$	$\bar{d}: 2.97$	$\bar{d}: -1$	$\bar{d}: 0.99$	$\bar{d}: 1.43$
$S_{\bar{d}}: 3.83$	$S_{\bar{d}}: 4.513$	$S_{\bar{d}}: 0.996$	$S_{\bar{d}}: 0.99$	$S_{\bar{d}}: 2.20$
$t: 0.49$	$t: 0.66$	$t: -1.996$	$t: 1.01$	$t: 0.65$
C_1-C_5	C_2-C_5	C_3-C_5	C_4-C_3	C_5-C_4
$\bar{d}: 0.441$	$\bar{d}: 2.575$	$\bar{d}: -1.43$	$\bar{d}: -0.43$	$\bar{d}: 0.43$
$S_{\bar{d}}: 3.44$	$S_{\bar{d}}: 5.69$	$S_{\bar{d}}: 2.207$	$S_{\bar{d}}: 1.49$	$S_{\bar{d}}: 1.49$
$t: 0.129$	$t: 0.446$	$t: -0.649$	$t: -0.29$	$t: 0.29$

Resultados de prueba t aplicada a ángulos

C_1-C_2	C_2-C_1	C_3-C_1	C_4-C_1	C_5-C_1
$\bar{d}: 29.07$	$\bar{d}: -29.07$	$\bar{d}: 2.55$	$\bar{d}: -27.77$	$\bar{d}: 3.6$
$S_{\bar{d}}: 23.96$	$S_{\bar{d}}: 14.03$	$S_{\bar{d}}: 12.95$	$S_{\bar{d}}: 10.92$	$S_{\bar{d}}: 11.5$
$t: 1.176$	$t: -2$	$t: 0.2$	$t: -2.56$	$t: 0.31$
C_1-C_3	C_2-C_3	C_3-C_2	C_4-C_2	C_5-C_2
$\bar{d}: -2.55$	$\bar{d}: -30.63$	$\bar{d}: 30.63$	$\bar{d}: 0.4$	$\bar{d}: 31.67$
$S_{\bar{d}}: 13.04$	$S_{\bar{d}}: 19.55$	$S_{\bar{d}}: 19.93$	$S_{\bar{d}}: 13.6$	$S_{\bar{d}}: 19.94$
$t: -0.195$	$t: -1.57$	$t: 1.54$	$t: 0.029$	$t: 1.6$
C_1-C_4	C_2-C_4	C_3-C_4	C_4-C_3	C_5-C_3
$\bar{d}: 27.7$	$\bar{d}: -0.7$	$\bar{d}: 30.22$	$\bar{d}: 30.22$	$\bar{d}: 1.04$
$S_{\bar{d}}: 10.49$	$S_{\bar{d}}: 13.56$	$S_{\bar{d}}: 11.65$	$S_{\bar{d}}: 24.34$	$S_{\bar{d}}: 9.15$
$t: 2.64$	$t: -0.15$	$t: 2.6$	$t: 1.24$	$t: 0.11$
C_1-C_5	C_2-C_5	C_3-C_5	C_4-C_5	C_5-C_4
$\bar{d}: -3.6$	$\bar{d}: -15.7$	$\bar{d}: -1.06$	$\bar{d}: -31.26$	$\bar{d}: 31.26$
$S_{\bar{d}}: 11.55$	$S_{\bar{d}}: 24.79$	$S_{\bar{d}}: 9.16$	$S_{\bar{d}}: 12.3$	$S_{\bar{d}}: 12.3$
$t: -0.31$	$t: -0.62$	$t: -0.116$	$t: -2.54$	$t: 2.54$

AGRADECIMIENTOS:

Al personal del ITU por la espontánea colaboración.

Al profesor Jorge de Silva del ITU por su aporte e intercambio de conocimientos.

Al prof. Cr. Rafael Díaz de Medina, profesor de Estadística de la Fac. de Ciencias Económicas por su orientación para realizar la comprobación de hipótesis.-

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperacion Bilateral Uruguay-Estados Unidos

PROPUESTA DE DOS MODIFICACIONES AL BALANCE HIDRICO DE
SUELOS SEGUN THORNTHWAITE Y MATHER (1955) Y SU APLICA
CION EN EL ESTUDIO HIDROLOGICO DE LA CUENCA DEL RIO
IBIRAPUITA EN EL ESTADO DE RIO GRANDE DO SUL, BRASIL.

Ing. José Barrios

Montevideo-Uruguay

RESUMEN

El propósito de este estudio es buscar una metodología para conocer el comportamiento de la red hidrográfica del río Tacuarembó, utilizando imágenes de satélite como fuente de información.

La cuenca del río Tacuarembó está situada al noreste de la República Oriental del Uruguay; se desarrolla en su totalidad dentro de los límites del país y comprende la mayor parte de los departamentos de Rivera y Tacuarembó.

Las formaciones geológicas predominantes son sedimentarias, apoyadas en discordancia sobre material cristalino fuertemente fracturado que aflora en parte del sector noreste de la cuenca.

Las unidades de suelos presentes son: litosoles, brunosoles eútricos, brunosoles subeútricos, vertisoles, luvisoles, luvisoles-acrisoles y gleysoles-planosoles.

La red de drenaje desarrolla un padrón dendrítico. Los cursos de agua que la integran muestran padrones de drenaje de tipo erosional en su sector superior y de posicional en su sector inferior, con un marcado anamostosamiento.

De acuerdo a la finalidad de este trabajo, a las características de la red de drenaje, al material geológico del sustrato y a la fuente de información utilizada, se propone aplicar una metodología en la cual se realiza un estudio cuantitativo de la red hidrográfica de la cuenca, mediante un análisis morfométrico.

Utilizando las imágenes de satélite LANDSAT, bandas 5 y 7, se obtuvo la red de drenaje de toda la cuenca, la que se superpuso y comparó con los mapas geológicos y de suelos. A efectos de simplemente mostrar la secuencia metodológica propuesta, se seleccionaron cinco cuencas, que se tomaron como modelo, de acuerdo a padrones de drenaje diferentes, con áreas que varían de 100 km^2 a 300 km^2 , desarrollados cada uno en formaciones geológicas homogéneas y diferentes entre sí: cristalino, formación Mangrullo (dos cuencas a efectos de comparación), formación Yaguarí y areniscas de Tacuarembó. Los padrones de drenaje de las cuencas seleccionadas, son dendríticos y subparalelos, con diferencias también en cuanto a la forma del contorno de la cuenca.

Para la aplicación de la metodología propuesta, se siguieron los siguientes pasos:

1. Se realizó la jerarquización de la cuenca de acuerdo al sistema dado por Strahler y se hicieron mediciones de longitudes de los cursos dentro de cada orden, del perímetro y área de la cuenca y de los ángulos de confluencia entre cursos de igual orden y con cursos de orden superior.

2. Se realizaron comparaciones entre los diferentes valores hallados.

3. Aplicación de índices y relaciones: de acuerdo a la jerarquización realizada (relación de bifurcación); de acuerdo a la forma (redondeamiento, elongación) y que tiene en cuenta la relación de la textura del material geológico y extensión de la red de drenaje (densidad de drenaje, textura geológica).

Reuniendo y comparando los valores hallados, se ve que existen diferencias en cuanto a forma de la cuenca y padrón de drenaje, explicadas fundamentalmente por efectos estructurales y diferencias entre material cristalino y sedimentario.

Se aplicó una prueba t en los valores hallados que pueden, por el número de individuos, ser tratados estadísticamente. Se encontraron diferencias significativas entre algunas de las cuencas.

Aplicando esta metodología a la totalidad de la cuenca, se obtendrían una serie de parámetros que contribuirían a una caracterización morfológica de la cuenca, y a establecer criterios para diferenciar cuencas, de acuerdo a su régimen hídrico.

RESUMEN

Se proponen dos modificaciones para la metodología de elaboración del balance hídrico de suelos propuesto por Thornthwaite y Mather (1955), ellas son:

- Utilizar en el balance la capacidad real de almacenamiento de agua de cada Unidad de Suelo, en lugar del valor fijo propuesto por los autores.
- Calcular el escurrimiento superficial y subsuperficial y deducirlo de la pluviometría mensual, haciendo el balance con el saldo pluviométrico resultante.

Se describe a continuación la aplicación de estas modificaciones al estudio de una cuenca hidrográfica hecho por el autor en ocasión anterior en el sur del Brasil y se discuten, aspectos metodológicos, resultados obtenidos y posibilidades de utilizar la misma metodología en algunas cuencas hidrográficas del Uruguay.

SUMMARY

Two modifications of Thornthwaite and Mather (1955) method for soil water balance are presented as follows:

- To use in the balance the real water storage capacity of the soil for each Soil Unit, instead of the fixed value proposed by the authors.
- To calculate the surface and subsurface runoff, subtracting it from precipitation and entering the balance with the remaining rainfall.

The application of the modified method to an hydrographic basin study made by the same author in a previous work in south Brasil, is also presented.

Methods, results and possibilities of using the same modified method in some basins in Uruguay are finally discussed.

Propuesta de dos modificaciones al balance hídrico de Suelos según Thornthwaite y Mather (1955) y su aplicación en el estudio hidrológico de la Cuenca del Río Ibirapuitá en el Estado de Río Grande do Sul - Brasil -.

1. ANTECEDENTES.

El método de balance hídrico de suelos propuesto por Thornthwaite y Mather (1955) es una de las maneras más claras de explicar las fluctuaciones de la humedad del suelo y determinar déficit de humedad, evapotranspiración real y excedentes de agua.

Sin embargo este método utiliza dos suposiciones que limitan su precisión; estas son por una parte, la capacidad de almacenaje del agua en el suelo que los autores fijan en 100 ó 125 mm y que en realidad es variable para cada perfil de suelo; la otra suposición consiste en entrar al balance con el valor íntegro de la pluviometría que llega al suelo; en la realidad sabemos que la lluvia se reparte entre evapotranspiración, escurrimiento y percolación profunda antes que la capacidad de almacenaje del suelo sea satisfecha.

Barrios (1975) informó sobre los resultados obtenidos al hacer modificaciones a la metodología de balance hídrico de suelos propuesta por Thornthwaite y Mather, obteniendo de esta manera déficits y excedentes de agua más de acuerdo con las observaciones de terreno.

El estudio referido fue realizado en Brasil dentro de la Cuenca del Río Ibirapuitá en Alegrete, Estado de Río Grande Do Sul. Fue aprovechado al mismo tiempo el estudio hidrológico de dicha cuenca realizado por la Companhia Estadual de Energia Electrica (C.E.E.E.) (1966) en base a 15 años de mediciones en la Estación Hidrométrica sobre el mismo río, localizada en la ciudad de Alegrete, RS., Brasil.

En esta oportunidad se presenta un resumen de los elementos principales del trabajo referido con énfasis en su metodología e información básica necesaria y se analizan con mayor detalles, sus conclusiones. Al mismo tiempo se presentan características ecológicas y climáticas que podrían justificar la aplicación de la metodología expuesta en algunas cuencas hidrográficas del Uruguay.

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA.

El Río Ibirapuitá es afluente del Río Ibicuí que a su vez descarga en el Río Uruguay, a unos 40 kms. al norte de la ciudad de Uruguayana. Este río nace en la

vertiente norte de la Cuchilla de Santa Ana cuya línea divisoria de aguas sirve de límite internacional entre Uruguay y Brasil en esta región y corre en dirección norte.

En la vertiente sur de esta cuchilla nacen los ríos uruguayos Tacuarembó y Cuñapirú que corren en dirección sur y este, para desembocar en el Río Negro (Fig.1)

Geología y Suelos.

Desde el punto de vista geológico la cuenca del Río Ibirapuitá forma parte de la estratigrafía que se presenta en la mitad norte del Estado de Río Grande do Sul en Brasil y que se prolonga por el oeste hacia el sur, penetrando en Uruguay hasta poco más al sur del Río Negro. En el Estado de R. G. do Sul, ella está presente en toda la región del Planalto Riograndense y en la región la "Campanha" contigua a Uruguay.

En líneas muy generales esta estratigrafía se caracteriza por la presencia subyacente de sedimentos consolidados triásicos, que en algunos casos afloran a la superficie, constituyendo en Brasil los conglomerados y "arenitos" Botucatu, Maricá y otros, y en Uruguay, la formación Tacuarembó. Estos sedimentos triásicos están cubiertos generalmente por una sucesión de derrames basálticos del período cretáceo inferior, cuya profundidad llega a algunas centenas de metros en la región del Planalto Riograndense, para disminuir hacia el extremo sur a algunas decenas de metros (Fig. 2). Estos derrames basálticos se denominan en Brasil como formación Serra Geral y en Uruguay, como formaciones Miguez, Arequita, Arapey y otras.

La cuenca del Río Ibirapuitá está dominada por suelos litosólicos arenosos muy superficiales derivados de basalto (formación Serra Geral) que se denominan como Unidad Pedregal, fases suave ondulado, ondulado y fuertemente ondulado, que representan en conjunto, unas 377, 200 hectáreas. También existen suelos franco arenosos profundos derivados de sedimentos consolidados ("Arenitos" Batucatu) que suman 61.700 hectáreas. Asociaciones de los suelos referidos y afloramientos de rocas, complementan la superficie de la cuenca que en total tiene 576.700 hás.

Clima.

El clima de esta región se caracteriza por una gran amplitud térmica entre el mes de julio que presenta una media mensual de 12,2°C y el mes de enero que llega a 25,2°C. Los valores mensuales de evapotranspiración potencial reflejan esta amplitud y varían de un mínimo de 31 mm. en el mes de junio a un máximo de 172 mm. en enero, con un valor medio anual de 1209 mm. Estos valores fueron calculados por F.S. da Mota y otros (1971) según la ecuación de Penman.

Con respecto a la pluviometría, la cuenca en estudio se encuentra entre los valores medios anuales de 1416 mm. en Santana do Livramento y 1586 mm en Alegrete. El valor medio tomado por la C.E.E.E. es de 1385,5 mm.

La pluviometría es relativamente estable en la cuenca; son muy escasos los años en que ella sobrepasa 1700 mm. o baja de 1000 mm. Sin embargo, dentro del año existen épocas lluviosas en los meses de abril y mayo con unos 130 mm. mensuales y en los meses de septiembre y octubre con unos 170 mm. mensuales. Los períodos menos lluviosos ocurren en febrero, agosto y noviembre con unos 90 mm. mensuales.

2. SINTESIS DEL TRABAJO REALIZADO.

2.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA.

Según el Departamento Nacional de Meteorología del Ministerio de Agricultura (1972), los suelos existentes entre los puestos meteorológicos de Santana do Livramento y Alegrete, no presentan déficits de humedad en ningún mes del año. Por otra parte, de los mismos balances se desprende que los excedentes de agua en la cuenca, son de 535 mm. y 678 mm. anuales, para los dos puestos referidos, respectivamente.

Silveira da Mota y otros (1971) calcularon para Santana do Livramento déficits de humedad de 6 mm. anuales y excedentes de agua de 558 mm. al año. Para Alegrete los déficits fueron calculados entre 15 y 57 mm. anuales, considerando capacidad de almacenamiento variable entre 50 y 400 mm.

La región de la "campanha riograndense" a la cual pertenece la cuenca en estudio, se caracteriza por una fuerte sequía estival que afecta significativamente la producción de forrajes. Esto ocurre aún cuando la lluvia media mensual supera la evapotranspiración potencial en todos los meses del año y está distribuida en 5 ó 8 días de lluvia por mes. Evidentemente, los estudios referidos no reflejan las deficiencias hídricas que sufre la región.

2.2. METODOLOGIA DE TRABAJO.

Con el objetivo de obtener balances hídricos más representativos de las condiciones hidrológicas de la cuenca en estudio, fueron ensayadas como se dijo, dos modificaciones importantes en la metodología de Thornthwaite y Mather; ellas son:

- Calcular para cada Unidad de Suelos la capacidad de almacenaje de agua y hacer el balance hídrico con el valor obtenido.

- Deducir el escurrimiento superficial y subsuperficial de la pluviometría usando en ambos casos, valores medios mensuales y hacer el balance hídrico con el saldo pluviométrico resultante.

Capacidad de almacenaje de agua en el suelo.

Este valor se obtuvo en base a los valores de equivalente de humedad, porcentaje de marchitez y densidad aparente disponibles por horizonte en cada Unidad de Suelos. A falta de esa información, es posible obtener dicha capacidad en forma aproximada de la relación siguiente:

$$h = 0,0806 \times \text{humedad equivalente} \quad (1)$$

donde "h" resulta en mm. de altura de agua que se pueden almacenar en un centímetro de profundidad de suelo. Esta relación se obtuvo de las equivalencias siguientes propuestas por Daker (1969).

$$\text{Capacidad de campo} = 1,30 \times \text{humedad equivalente} \quad (2)$$

$$\% \text{ de marchitez} = 0,68 \times \text{humedad equivalente} \quad (3)$$

$$\text{Densidad aparente} = 1,30 \text{ (valor aproximado)} \quad (4)$$

La Humedad Equivalente puede obtenerse de la relación propuesta por Gardner y citada por Sganga y Terzaghi (1982).

$$H.E. = 0,027 \times \% \text{ Arena} + 0,187 \times \% \text{ Limo} + 0,555 \times \% \text{ Arcilla} \quad (5)$$

Deducción del escurrimiento superficial y subsuperficial.

La idea de deducir el escurrimiento superficial y subsuperficial de la precipitación viene de considerar que en cuencas hidrográficas cerradas en las que no hay variación del almacenaje subterráneo, el agua de lluvia que llega al suelo sólo tiene dos vías de escape: la evapotranspiración y la descarga fluvial. De este modo, para un valor pluviométrico dado, el aumento de una de ellas significaría disminución de la otra; dicho en otras palabras, el agua de lluvia que en pocas horas se escurre por el sistema de drenaje superficial, no estará disponible para ser almacenada en el suelo y ser utilizada posteriormente por la vegetación.

Esta deficiencia de infiltración obedece a razones directas que en este caso podrían sintetizarse así:

- Ocurrencia frecuente de lluvias cuya intensidad supera la velocidad de infiltración del suelo.
- Presencia de impedimentos a la infiltración normal del agua en el suelo, como ser:

- . Topografía ondulada que favorece el escurrimiento rápido del agua hacia sus colectores naturales.
- . Sellamiento de la superficie del suelo por efecto de arrastre y depositación de elementos finos.
- . Existencia de una micro red de drenaje superficial creada como resultado de erosión laminar.
- . Presencia de burbujas de aire en el suelo que hacen más lenta la infiltración en los primeros momentos de una lluvia.

- Limitación de recursos e informaciones básicas que obligan a efectuar balances hídricos mensuales. Al proceder de este modo se trabaja con sumatorias de valores de lluvia y evapotranspiración y no se contabilizan los posibles excedentes de agua y sus consecuentes déficits de humedad, que puedan haber ocurrido dentro del mes considerado.

La cuantificación del escurrimiento superficial es compleja. En este caso se hizo a partir del hidrograma mensual del río preparado por la C.E.E.E.(1966) en base a 15 años de mediciones, aceptando que el flujo básico del río sea el indicado por el mes de menor caudal y atribuyendo el caudal fluctuante al escurrimiento superficial y subsuperficial.

2.3. DESARROLLO DEL TRABAJO.

Litología dominante.

En la Fig. 3 puede observarse que la cuenca en estudio está dominada por basalto con relieve escalonado; sólo en la parte oriental de ella aparecen areniscas con morfología de colinas aplanadas ('cuchillas tabulares'). En las cajas de los ríos se encuentran sedimentos cuaternarios.

Red Hidrológica.

En la Fig. 4 se encuentran los nombres de los ríos y arroyos que integran la red de drenaje de la cuenca y sus posiciones relativas. Los ríos que corren sobre basalto presentan numerosos meandros y su curso es sinuoso, en tanto que si el basamento es de areniscas, el río presenta un curso más suave y más recto.

Unidades de Suelo.

En la Fig. 5 pueden observarse la localización de las 11 Unidades de Suelos que están descriptas en la cuenca y cuyas superficies relativas aparecen en el Cuadro 1.

Alturas de aguas almacenadas por Unidades de Suelos.

Estos valores aparecen en el Cuadro 2 calculados en la forma descripta en 2.2. Las tres fases de la Unidad Pedregal fueron consideradas para este fin como una sola unidad.

Para fines de elaboración de balance hídrico las Unidades de Suelos fueron agrupadas según su capacidad de almacenaje (Cuadro 3).

Cálculo del escurrimiento superficial y de la pluviometría.

En base a los datos del estudio hidrológico de esta cuenca hecho por la C.E.E.E. (1966) fue separado el escurrimiento superficial del caudal básico del río en la forma descripta en 2.2. Al deducir el escurrimiento superficial de la pluviometría "in natura" se obtiene un valor que fue denominado pluviometría efectiva y con el cual se encabezan los balances hídricos de los grupos de Unidades de Suelos ya referidos. La Fig. 6 ilustra este cálculo.

Evapotranspiración potencial (ETP).

Se utilizan, como se dijo, los valores calculados por Silveira da Mota para Alegrete en base a la ecuación de Penman.

Balances hídricos de suelos.

Contando con la pluviometría efectiva, las demandas de aguas potenciales y la capacidad de almacenaje de agua del perfil de suelo, de cada uno de los grupos de suelos ya referidos, fueron elaborados los balances hídricos según la metodología de Thornthwaite y Mathe: , según aparece en las Figs. 7 y 8 para suelos con capacidad de almacenamiento de 22 mm. y 114 mm. respectivamente.

3. RESULTADOS OBTENIDOS.

3.1. DEFICIENCIAS HIDRICAS.

El Cuadro 4 presenta estos resultados por mes y por grupo de suelos.

3.2. EXCEDENTES POR DRENAJE INTERNO.

Estos resultados aparecen resumidos en el Cuadro 5, por mes y por grupo de suelos. Estos valores al ser multiplicados por el coeficiente de área de cada grupo de suelos, indican la lámina de agua que ese grupo aporta al caudal del río. Finalmente, se calculó la lámina ponderada que el drenaje interno aporta al río y que resultó ser de 68,54 mm. por año.

3.3. EXCEDENTES POR ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.

Estos valores mensuales calculados por este concepto aparecen en la Fig.6 y suman 328,9 mm. anuales.

4. CONCLUSIONES

4.1. SUELOS DEL GRUPO "A" (CAP. DE ALMACENAJE DE AGUA 22 mm).

El déficit normal de estos suelos resultó ser de 245 mm. al año, distribuido entre los meses de noviembre y febrero. Este valor es superior al indicado por estudios anteriores y concuerda mejor con las observaciones del terreno.

La relativa abundancia de agua superficial por una parte, y el notorio déficit de humedad de los suelos por otra, puede inducir a elaborar proyectos de riego para esta región. Considerando la alta frecuencia de riego que sería necesario adoptar y la limitación de los resultados económicos que sería lógico esperar, no parece aconsejable elaborar proyectos multiprediales y sería más razonable hacer proyectos a nivel predial, con énfasis en utilización de la mano de obra existente y mínimo de inversión en equipos e instalaciones.

Finalmente, debe pensarse que el mejoramiento de las praderas en base a especies adoptadas al medio ecológico, será la solución más racional para el aumento de la productividad ganadera de la región.

4.2. SUELOS DEL GRUPO "B" (CAP. DE ALMACENAMIENTO DE AGUA MAYOR DE 114 mm).

En estos suelos el déficit de humedad se retrasa en 30 días y en total suma 152 mm. distribuidos entre diciembre y febrero.

El aporte que estos suelos hacen al caudal del río proviene casi exclusivamente del escurrimiento superficial en razón de que el drenaje interno no es significativo en ningún mes del año.

4.3. COMPARACION ENTRE LA DESCARGA O CAUDAL DEL RIO IBIRAPUITA MEDIDA EN ALEGRETE R.G.S. Y LOS EXCEDENTES DE AGUA CALCULADOS EN EL BALANCE HIDRICO.

Según los datos del Cuadro 5, los suelos de la cuenca aportan en forma conjunta una lámina ponderada de 68,54 mm. al año. Al sumar este valor con los 328,90 mm. de escurrimiento superficial calculados (Fig. 6), resulta una descarga anual de 397 mm.

La descarga anual medida por la C.E.E.E. en 15 años de observación, da un valor de 479 mm. (Fig. 6).

Como en los dos casos se utilizó la misma pluviometría de 1385,5 mm. anuales puede pensarse que el escurrimiento superficial y el drenaje interno reales son mayores que los calculados y que los déficits de humedad también son un poco mayores. Sin embargo, los valores determinados están más aproximados a la realidad que los obtenidos en estudios anteriores.

4.4. POSIBILIDADES DE APLICACION DE ESTA METODOLOGIA PARA DETERMINAR CON MAS EXACTITUD LA DEFICIENCIA DE AGUA DE LOS CULTIVOS EN URUGUAY.

Durante el verano 1982-1983 el Convenio MAP-IICA (Fondo Simón Bolívar) realizó un ensayo demostrativo de cultivos de papas de verano en el Departamento de Tacuarembó donde mediante aplicación de una lámina de riego neta de 171 mm. distribuidos en tres riegos, el agricultor obtuvo un aumento de rendimiento de 270% con respecto a la cosecha media de la región, en la misma temporada. Según los estudios disponibles, la deficiencia media de agua en la Región Central Norte de Uruguay está entre 40 y 50 mm. anuales. Aparentemente este valor es inferior al déficit real de humedad que debe enfrentar normalmente la agricultura y la producción de forrajes en esta región y la aplicación total o parcial, de la metodología expuesta podría ser una forma de determinarlo.

Cuadro 1 Símbolo, nombre, superficie y participación de las Unidades de Suelo que integran la Cuenca del Río Ibirapuitá, aguas arriba de la ciudad de Alegrete.

Símbolo	Nombre de la Unidad de Suelos	Superficie Háts.	% en la cuenca
Pe 1	Pedregal, fase suave ondulada	181.500	31.45
Pe 2	Pedregal, fase ondulada	112.300	19.45
Pe 3	Pedregal, fase fuerte ondulada	83.400	14.45
S.P.	Sao Pedro	61.700	10.70
Va 1	Vacacai	20.100	3.60
ES	Escobar	11.700	2.02
CA	Camaquá	1.500	0.26
Pe 1, SP, ES, AR.	Asociación Pedregal suave ondulada Sao Pedro, Escobar y Afloramiento rocas.	79.900	13.80
L, SP.	Asociación Livramento y Sao Pedro	14.500	2.52
SP, SM.	Asociación Sao Pedro y Santa Maria	5.200	0.90
Pe 1, ES.	Pedregal suave ondulado y Escobar	4.900	0.85
Superficie total:		576.700	100.00

Fuente: Brasil. Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife, 1973.

Cuadro 2 Cálculo de las alturas de aguas almacenables en los perfiles de las Unidades de Suelos de la Cuenca.

Suelo	Horizontes		Textura	Equivalente de humedad %	Porcentaje de marchitez	Densidad Aparente	Agua (cm) almacenada	Mat. gen.
	Nombre	Prof.cm.						
Pedregal(Pe1 Pe2, Pe 3)	A	0-15	Fr.arenoso	21,0	11,4	1,5	2,16	Basalto
	C	15 +	--	--	--	--	--	
	A 1	0-65	Fr.arenoso	10,5	5,7	1,5	4,68	
	A 2	65-100	Fr.arenoso	16,0	8,7	1,5	3,84	
Sao Pedro (SP)	B	100-210	Fr.arg.ar.	19,0	10,3	1,3	12,40	Arenito
	C	210 +	--	--	--	--	--	
							20,92	
Vacacai (Va 1)	A	0-70	Fr.arenoso	11,5	6,2	1,5	5,52	Aluvi6n
	B	70-120	Fr.arcilloso	25,0	13,6	1,35	7,70	
	G	120 +	Arena gruesa	--	--	--	--	
Escobar (ES)	A 11	0-15	Argila	57,0	31,0	1,25	13,22	Basalto
	A 12	15-70	Arg.pesada	65,0	35,4	1,25	4,87	
	C	70 +	--	--	--	--	20,35	
Camaqua (CA)	A	0-42	Fr.arenoso	11,5	6,25	1,5	25,22	Granito
	B 1	42-58	Fr.arcil.	19	10,3	1,35	3,30	
	B 2	58-120	Arcilla	20,5	11,2	1,25	1,88	
	B 3	120-150	Arc.arenosa	20,0	10,9	1,30	7,21	
	C	150 +	--	--	--	--	3,54	
As.Pe1-SP-Es-AR	--	0-70	Fr.arenosa	10,5	5,7	1,5	15,93	Granito
As. L-SP	--	0-120	Fr.arc.aren.	16,0	8,7	1,3	5,04	
As.SP-SM	--	0-110	Fr.arenoso	21,0	11,4	1,5	11,38	
As Pe 1-Es	--	0-40	Fr.arcill.	25,0	13,6	1,35	15,84	
							6,15	

Fuente: Brasil. Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife, 1973.

Cuadro 3 Agrupación de las Unidades de Suelo según su capacidad de almacenaje de agua.

Grupo	Unidades	Símbolo	Lámina almacenable	Superficie en há.s.	%
A	Unidades:				
	Pedregal suave ondulada	Pe 1			
	Pedregal ondulada	Pe 2			
	Pedregal fuert.ondulado	Pe 3	22 mm.	377.200	65,35
B	Unidades:				
	San Pedro	Sp			
	Vacacaí	Va 1			
	Escobar	ES			
	Cahaguá	CA			
	Asociación:				
	Livramento	L			
	San Pedro	SP			
	Asociación:				
	San Pedro Santa María	SP SM	Entre 114mm. y 252 mm.	114.700	20,00
C	Asociación:				
	Pedregal suave ondulada	Pe 1			
	San Pedro	SP			
	Escobar	ES			
Aforam de rocas	AR	50 mm.	79.900	13,80	
D	Asociación:				
	Pedregal suave ondulada	PE 1			
Escobar	ES	62 mm.	4.900	0,85	
				576.700	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4 Deficiencias hídricas en mms. de los suelos de la cuenca del río Ibirapuitá agrupados según su capacidad de almacenaje de agua.

Mes	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0
Setiembre	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0
Noviembre	76,9	0	48,9	36,9
Diciembre	68,2	52,7	68,2	68,2
Enero	53,3	53,3	53,3	53,3
Febrero	46,4	46,4	46,4	46,4
Marzo	0	0	0	
Abril	0	0	0	
Mayo	0	0	0	
Junio	0	0	0	
TOTAL:	244,8 mm.	152,4 mm.	216,8 mm.	204,8 mm.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5 Drenaje interno en mm. de los suelos de la cuenca del río Ibirapuitá agrupados según su capacidad de almacenaje de agua.

Mes	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Julio	8,2 mm	0 mm	8,2 mm	8,2 mm
Agosto	0	0	0	0
Setiembre	1,7	0	1,7	1,7
Octubre	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0
Enero	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0
Abril	0,1	0	0	0
Mayo	37,0	0	9,1	0
Junio	45,4	0	45,4	42,5
Total	92,4	0	64,4	52,4
Coefficiente	0,564	0,200	0,138	0,085
Aporte al drenaje de la cuenca	59,22 mm	0	8,88 mm	0,44 mm

Fuente: Elaboración propia.

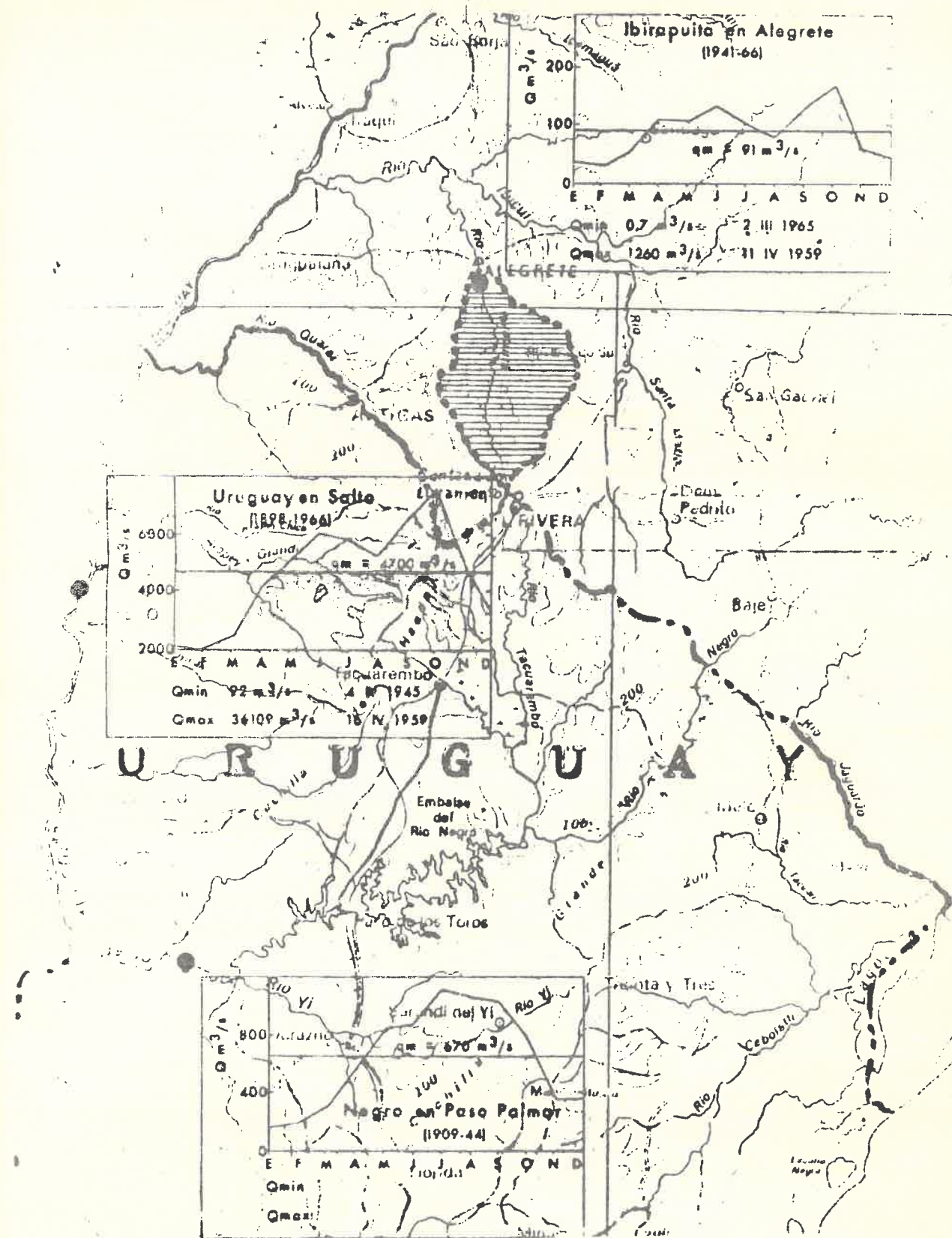


Fig. 1 Localización de la cuenca del río Ibirapuitá en RS - Brasil.

Fuente: O.E.A. Unidad de Recursos Naturales, Cuenca del Río de la Plata. Mapa de Hidrogramas típicos, Washington D.C., 1969.

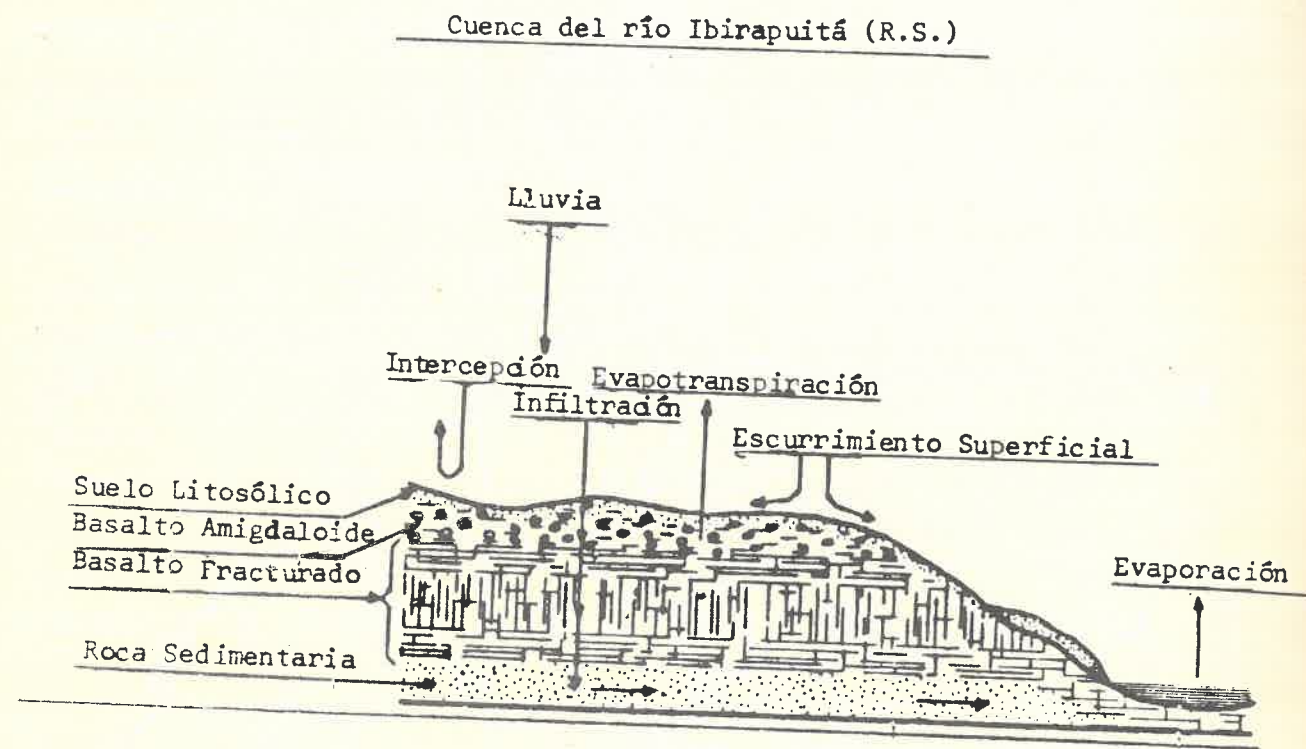


Fig. 2 Estratigrafía de la cuenca del río Ibirapuitá

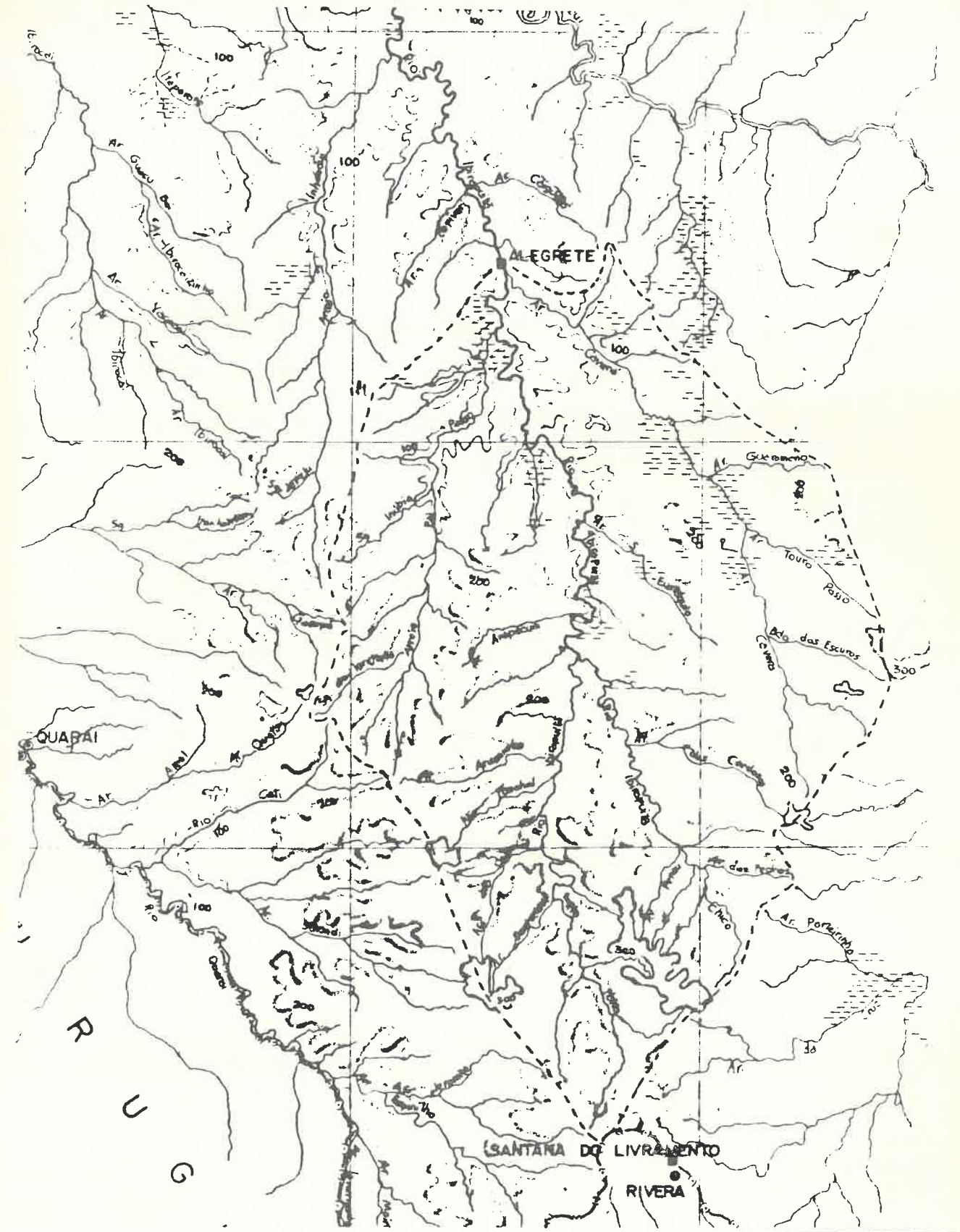


Fig. 4 Cuenca hidrográfica del río Ibirapuitá. Esc. 1:750.000

Fuente: Ministério da Agricultura. INCRA. Levantamento e avaliação de recursos naturais, sócio-econômicos e institucionais do R.G.do Sul. Vol.1, Brasília 1973.

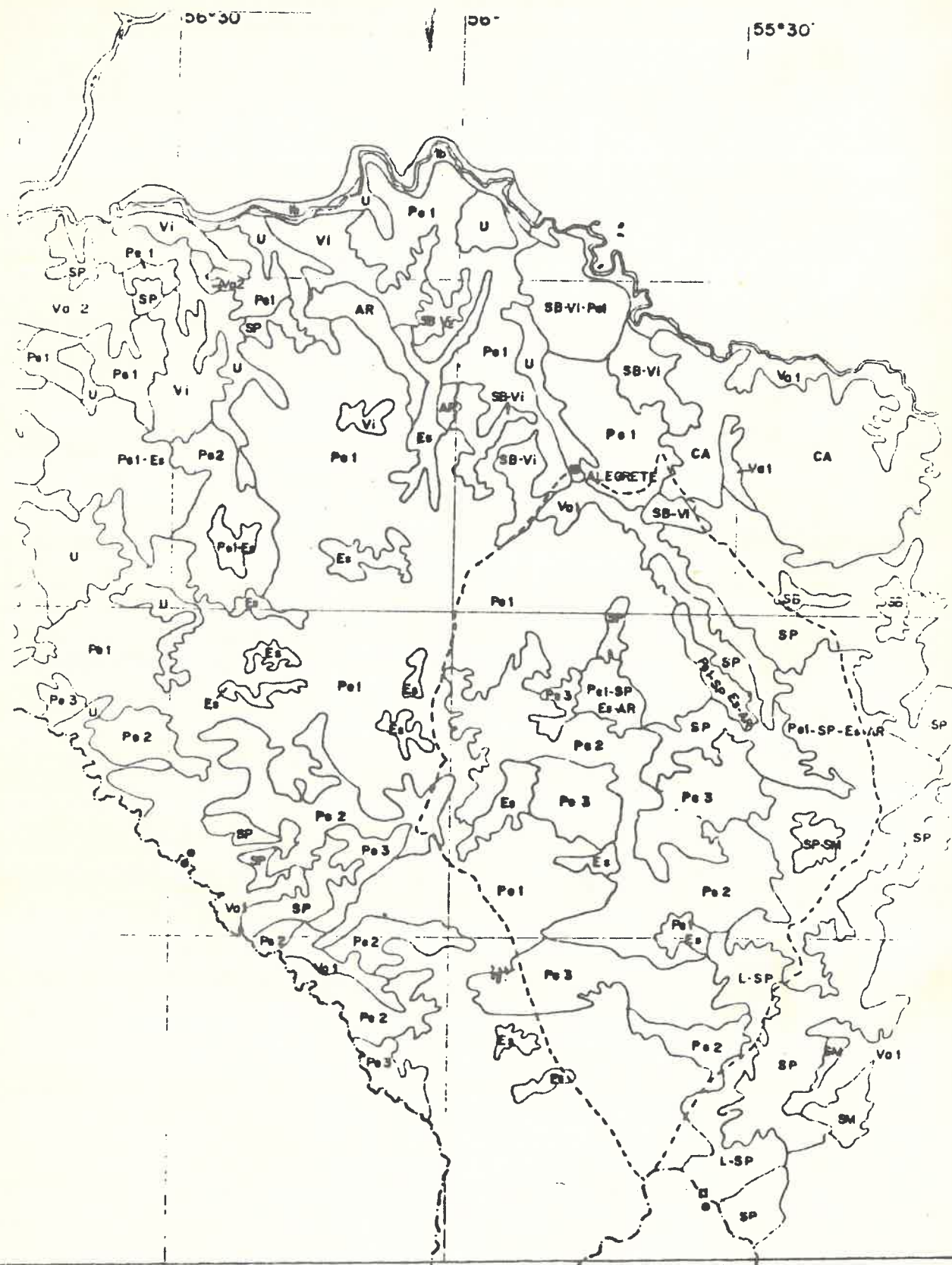


Fig. 5 Unidades de suelos presentes en la cuenca del río Ibirapuitá.

Fuente: Brasil. Ministério da Agricultura. Divisão da Pesquisa Pedológica. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife, 1973.

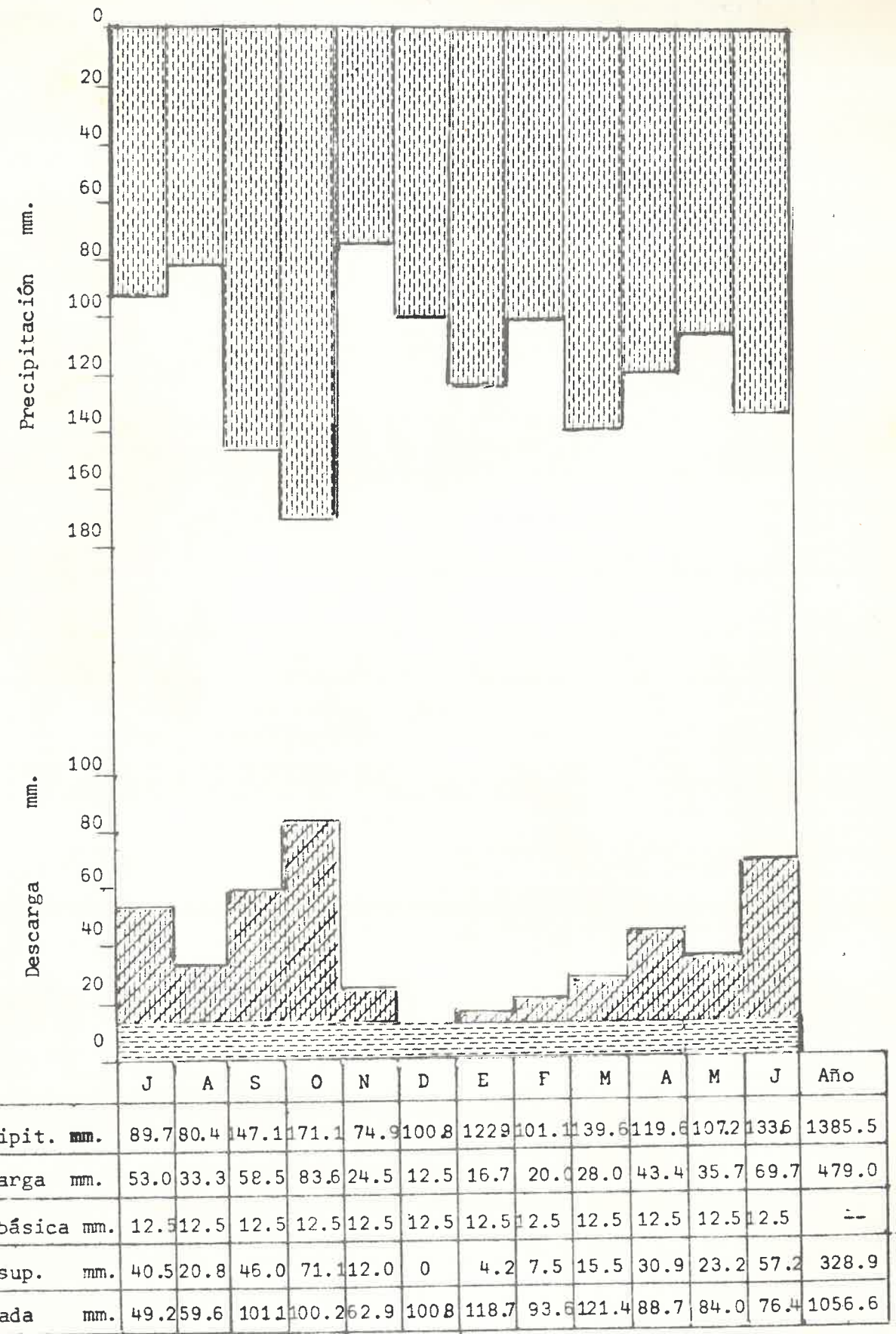
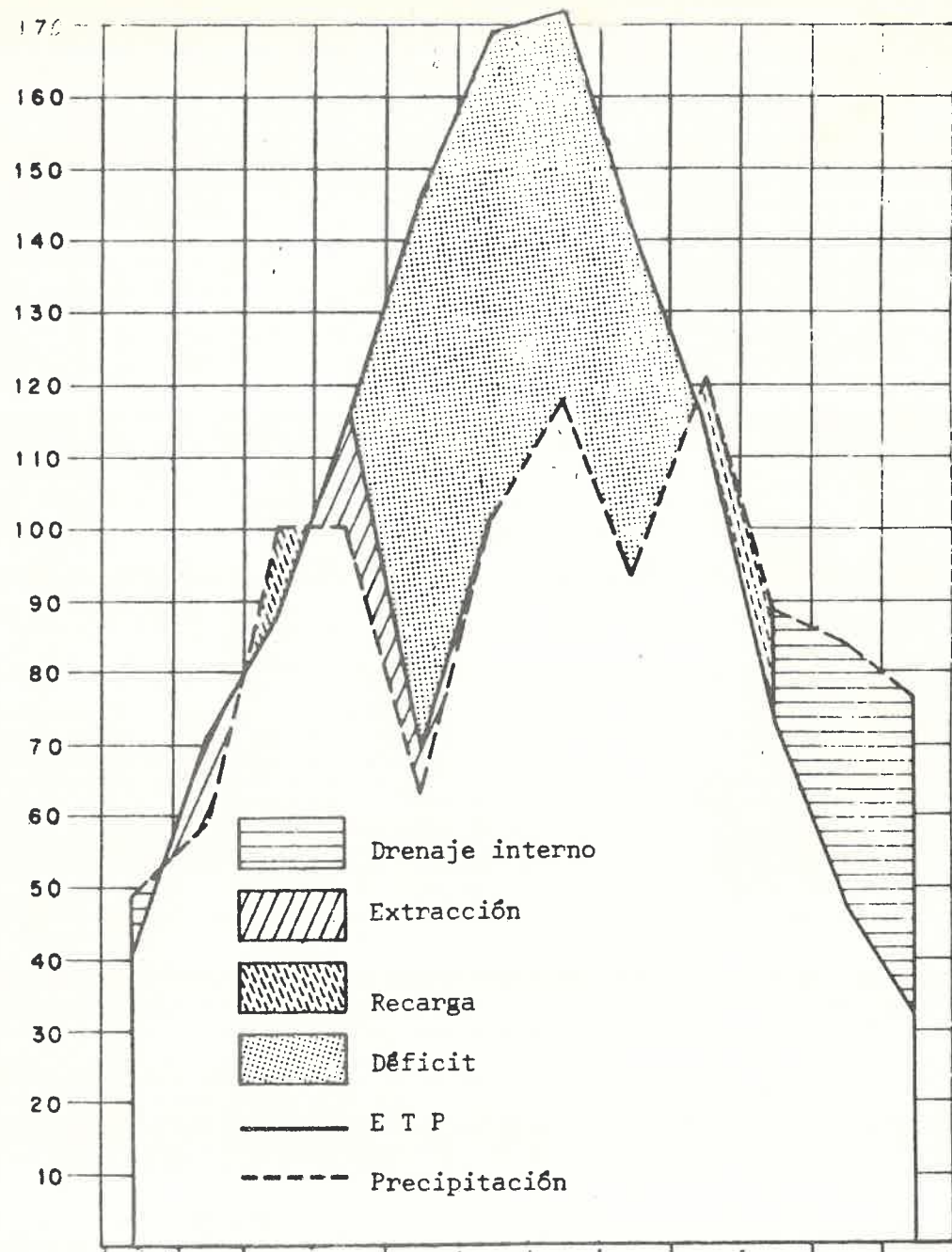
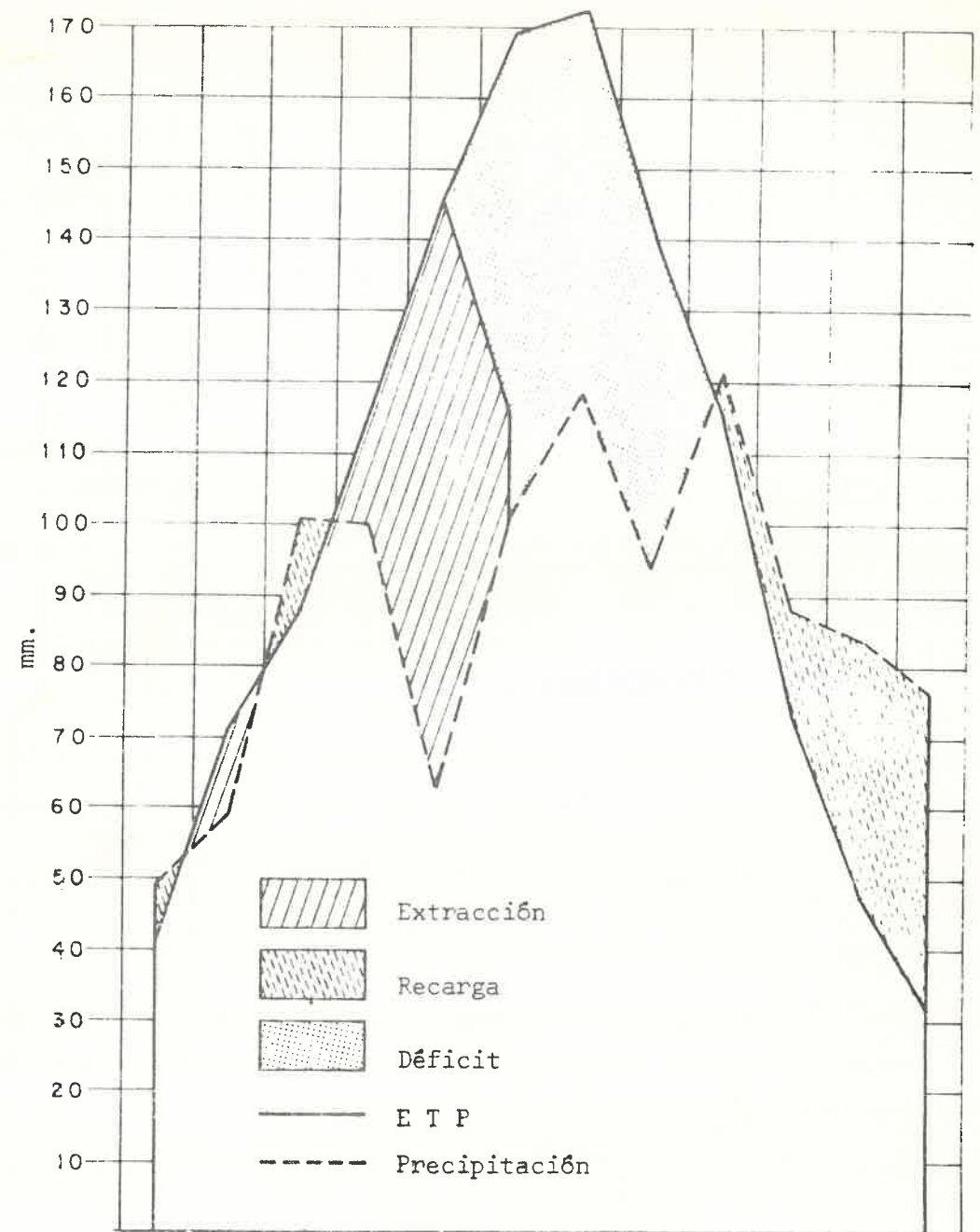


Fig. 6 Cálculo de la precipitación de entrada al balance hídrico.



	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	Año
Precipit. efect.	49.2	59.6	101.1	100.2	62.9	100.8	118.7	93.6	121.4	88.7	84.0	76.4	1056.6
ETP	41	71	88	116	146	169	172	140	115	73	47	31	1209.0
1 - 2	+8.2	-11.4	+13.1	-15.8	-83.1	-68.2	-53.3	-46.4	+6.4	+15.7	+37.0	+45.4	--
Recarga	22	10.6	22	6.2	0	0	0	0	6.4	22	22	22	--
Déficit	8.2	0	1.7	0	0	0	0	0	0	0.1	37.0	45.4	92.4
Extracción	0	11.4	0	15.8	6.2	0	0	0	0	0	0	0	--
Déficit	0	0	0	0	76.9	68.2	53.3	46.4	0	0	0	0	244.8
ETR	41	71	88	116	59.1	100.8	118.7	93.6	115	73	47	31	964.2

Fig. 7 Balance hídrico para Unidades de Suelo con capacidad de almacenamiento de 22 mms.



	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	Año
1) Precipitación	49.2	59.6	101.1	100.2	62.9	100.8	118.7	93.6	121.4	88.7	84.0	76.4	1056.6
2) ETP	41	71	88	116	146	169	172	140	115	73	47	31	1209.0
3) 1-2	+8.2	-11.4	+13.1	-15.8	-83.1	-68.2	-53.3	-46.4	+6.4	+15.7	+37.0	+45.4	--
4) Recarga	112.7	101.1	114.4	98.6	15.5	0	0	0	6.4	22.1	59.1	104.5	--
5) Dren. Int.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6) Extracción	0	11.4	0	15.8	83.1	15.5	0	0	0	0	0	0	--
7) Déficit	0	0	0	0	0	52.7	53.3	46.4	0	0	0	0	152.4
8) FTR	41	71	88	116	146	116.3	118.7	93.6	115	73	47	31	1056.6

Fig. 8 Balance hídrico para Unidades de Suelo con capacidad de almacenamiento igual o mayor de 114 mms.

REFERENCIAS

- (1) Barrios, José. 1975. Contribuição ao estudo da ecologia das regiões com solos rasos e alta pluviosidade. Caso da bacia do Rio Ibirapuitá em Alegrete R.S. III Seminario Nacional de Irrigação e drenagem. Fortaleza Ce. Brasil.
- (2) Companhia Estadual de Energia Eletrica. 1966. Características hidrologicas do R.G. do Sul. 54 pg. Porto Alegre, RS., Brasil.
- (3) Daker, Alberto. A agua na agricultura. Vol. I 302 pg. Rio de Janeiro, Brasil.
- (4) Departamento Nacional de Meteorología. 1972. Balanço Hídrico do Brasil. 94 pg. Ministerio de Agricultura. Rio de Janeiro, Brasil.
- (5) Ministerio de Agricultura. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. Levantamento e avaliação de recursos naturais, socio-economicos e institucionais do Rio Grande do Sul. Vol.1 Brasilia 1973.
- (6) Ministerio de Agricultura. Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul, Recife 1973.
- (7) Mota da, F.S. y otros. 1971. Zoneamento Agroclimatico do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Circular N° 50, 80 pg. Ministerio de Agricultura. Pelotas, R.S., Brasil.
- (8) Organización de Estados Americanos. Unidad de Recursos Naturales, Cuenca del Río de la Plata. Hidrogramas típicos. Washington D.C., 1969.
- (9) Sganga, J.C. y Terzaghi, A. 1982. Características físicas de los principales suelos agrícolas de Canelones. Parte II. Agua disponible en el suelo. 46 pg. Dirección de Suelos, Ministerio de Agricultura, Montevideo-Uruguay.
- (10) Thornthwaite, C.W. y Mather J.R. 1955. The water balance. Drexel Institute of Technology. Laboratory of Climatology. Publications in Climatology. Vol.VIII, N°1, Centerton, New Jersey, USA.

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

INDICE DE EROSIÓN DE LLUVIAS EN URUGUAY
(Factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo)

Ing. F. García
Ing. Julio Pannone

Montevideo-Uruguay

ABSTRACT

The value of the rainfall erosion index for a given rainstorm (EI_{30}), equals the product of the total storm energy (E) times the maximum 30 minutes intensity (I_{30}). The total annual average value of EI_{30} in a particular locality, is the rainfall erosion index for that place.

Rain showers of less than 13 mm and separated from other rains, by more than 6 hours, were omitted from the erosion index computations.

The published EI_{30} values, were based on 23 years rainfall records in Montevideo, 27 years in La Estanzuela, Paso de los Toros, Paysandú, Bella Unión, Rivera and 33 years in Treinta y Tres. The percentage of erosive storms for each locality is: 28,1% in Montevideo, 29,4% in La Estanzuela, 30,2% in Treinta y Tres, 29,7% in Paso de los Toros, 32,2% in Paysandú, 36,1% in Bella Unión and 37,7% in Rivera. The seasonal distribution of erosive storms is similar in all localities of the country that were analyzed, and it shows a concentration in spring and summer months.

The annual average values of EI_{30} in Uruguay, range from less than 400 to more than 750. The annual average values and standard deviation of EI_{30} for each locality are respectively (metric units):

Montevideo 382 and 193, La Estanzuela 522 and 179, Treinta y Tres 462 and 199, Paso de los Toros 553 and 252, Paysandú 659 and 236, Bella Unión 685 and 245, Rivera 779 and 351.

The seasonal distribution is similar in the seven localities that were studied. The largest values generally occur in December, January, February and March. In Montevideo 48,1% of the annual EI_{30} value, occurs from December to March, 54,1% in La Estanzuela, 46,3% in Treinta y Tres, 39,7% in Paso de los Toros, 48,0% in Paysandú, 46,1% in Bella Unión and 38,1% in Rivera, for the same period. The EI_{30} value for each erosive storm is largest in summer and spring.

The isocrodot map was extended from Argentina according to research data developed by Rojas and Conde (1980).

1. INTRODUCCION. Este trabajo cumple con uno de los objetivos parciales del Plan Preliminar de Colaboración Recíproca en Relación al Tema de Conservación y Manejo de Tierras y Aguas en el Uruguay (MAP-INC-IIICA), cuyo objetivo general es colaborar en la formulación y puesta en operación de un Plan Nacional de Conservación de Suelos y Aguas.

La determinación para todo el territorio nacional del factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Wischmeier y Smith, 1961), junto con las estimaciones disponibles sobre el factor K, erodabilidad de los suelos (Puentes, 1981) y el manejo adecuado de la información extranjera, (Wischmeier y Smith 1978) para estimar los restantes (factores topográficos, LS, factor uso y manejo, C, y factor práctica mecánica conservacionista, P), permite una aproximación al uso del mencionado modelo de estimación de erosión laminar y en canalículos en Uruguay.

Dicho uso significa una guía para los técnicos que asesoran directamente a los productores agropecuarios en la toma de decisiones que consideren la conservación de suelos y aguas.

A la fecha de redactarse definitivamente este trabajo, existen dos publicaciones en que se reúne toda la información disponible, se discute su utilización por medio del modelo mencionado en Uruguay y se señalan sus alcances y limitaciones (García, 1982; Puentes y Szögi, 1983).

2. MATERIALES Y METODOS. El valor de la erosividad de la lluvia de una tormenta es el producto de la energía cinética de la lluvia (E) y la máxima intensidad de la misma en un período de 30 minutos (Wischmeier y Smith 1959). Dicho índice de erosividad se simboliza EI_{30} .

Para una intensidad de lluvia uniforme el valor de la energía cinética en toneladas/há.mm se obtiene de la ecuación empírica siguiente, desarrollada por Wischmeier y Smith (1958) en unidades inglesas y presentada por FAO (1967) en unidades del sistema métrico:

$$EC=12,142 + 8,877 \log x; \text{ siendo } x \text{ la intensidad en mm/hr de la lluvia.}$$

Durante una tormenta la intensidad varía, por lo que varía también la energía cinética. La misma debe calcularse para cada tramo de intensidad uniforme de la tormenta mediante la fórmula anterior y multiplicarse por la cantidad de milímetros caídos en el tramo correspondiente para expresarla en toneladas/há. Para tener la energía cinética total de la tormenta expresada de esta manera, debe hacerse la sumatoria de la que posee cada uno de sus tramos de intensidad uniforme.

La función logarítmica desarrollada por Wischmeier y Smith (1958) se ha encontrado que no opera bien con intensidades mayores a 63,5 mm/hr (Carter et al., 1974), aunque las mismas no son muy frecuentes en Uruguay. Debería determinarse en las condiciones del Uruguay si la intensidad de la lluvia y su energía cinética guardan la relación logarítmica obtenida por Wischmeier y Smith (1958), asumida en la obtención de los valores de EI_{30} en el presente trabajo.

La lectura de las bandas de pluviógrafo, no se realizó por tramos de intensidad uniforme, sino determinando la lámina del menor intervalo de tiempo impreso, posible de resolver visualmente en las bandas. Para el caso de bandas diarias, dicho intervalo fue de 10 minutos.

En la localidad de Treinta y Tres, parte de la información pluviográfica fue obtenida con bandas semanales. En ellas, el intervalo menor de tiempo de fácil resolución ocular, fue 30 minutos y en el mismo se hicieron las determinaciones de lámina de lluvia caída.

Aunque no concordante con intervalos de intensidad uniforme, la lectura de bandas de pluviógrafo cada 10 minutos, determina estimaciones de energía cinética, máxima intensidad en 30 minutos y por lo tanto EI_{30} más precisos y mayores que la lectura cada 30 minutos.

Para uniformizar la información en la localidad de Treinta y Tres, Rovira et. at. (1982) seleccionaron más de treinta tormentas de magnitud variable en los años con información pluviográfica diaria y se las leyó en intervalos de 10 y 30 minutos. La regresión lineal entre el EI_{30} calculado con lecturas en 10 minutos y el obtenido mediante lecturas en 30 minutos de las mismas tormentas, tuvo un coeficiente de correlación de 0,9996. Con la regresión obtenida, para los años con información pluviográfica semanal y lecturas cada 30 minutos, se estimó el valor del EI_{30} , como si la lectura se hubiera hecho cada 10 minutos:

$$EI_{30} (\text{lect. 10 min.}) = \frac{EI_{30} (\text{lect. 30 min.}) + 0,606}{0,943}$$

De acuerdo con Wischmeier y Smith (1958), no se consideraron erosivas las lluvias con lámina inferior a 13 mm.

De acuerdo con Wischmeier (1959), las lluvias separadas por menos de 6 horas entre sus inicios, se consideraron una sola tormenta.

El valor del EI_{30} se calculó como sigue:

$$EI_{30} = E \times I_{30} \times 10^{-3};$$

donde E es la anergia cinética de la tormenta en $tm/há$, I_{30} es la máxima intensidad de la tormenta en $mm/hora$ en período de 30 minutos y 10^{-3} un factor para reducir el valor del índice y hacerlo más manejable (Castro Filho et. al., 1978, por ejemplo, usan esta forma de cálculo).

Rojas y Conde (1980) encontraron una estrecha correlación entre el producto de la lámina de una lluvia y su máxima intensidad en 30 minutos y el EI_{30} de la tormenta. Los coeficientes de correlación encontrados son mayores a 0,993. Para la localidad de Paso de los Toros, se seleccionaron 51 tormentas de distinta magnitud de más de 13 mm y con ellas se estableció la regresión siguiente:

$$EI_{30} = 1.0125 + 0.0232 x; (r = 0,996);$$

donde x es el producto de la lámina de la tormenta y la máxima intensidad en 30 minutos. El uso de esta regresión, que evitó la lectura total de las bandas, se utilizó para determinar los valores del EI_{30} de las tormentas registradas en Paso de los Toros.

Las series de años con información pluviográfica son muy variables entre las localidades estudiadas. Por otra parte, para evitar variaciones cíclicas de largo plazo en el régimen de lluvias, se aconseja utilizar valores del factor R de la ecuación universal provenientes del estudio de series de por lo menos 20 años (Wischmeier, 1976). Esto llevó a estudiar la posibilidad de estimar el EI_{30} a partir de la lámina de lluvia, medida con pluviómetros. La información pluviométrica disponible en las localidades estudiadas es mucho más larga y completa que la pluviográfica, siendo además contemporánea entre localidades.

Rojas y Conde (1980) hicieron este tipo de estimaciones. En Estados Unidos este procedimiento fue usado para aumentar el número de sitios con información y constituir el mapa de isoerodentas (Wischmeier y Smith 1978). En este caso, la relación entre lámina de lluvia y EI_{30} fue exponencial.

Para la serie de años con información pluviográfica, como ya se explicó, se determinó el EI_{30} por tormenta y la lámina de lluvia. Al ser el EI_{30} altamente dependiente de la intensidad de la lluvia, y al variar ésta promedialmente dentro del año, se pensó en hacer cierta clasificación por intensidad, buscando regresiones para diferentes períodos del año. Se probó la lámina de cada estación del año

versus el EI_{30} acumulando para esa estación pero los coeficientes de determinación de las funciones postuladas fueron bajos. Los coeficientes de determinación más altos se obtuvieron de las regresiones entre la lámina de lluvia mensual (considerando sólo láminas mayores a 13 mm) y el EI_{30} mensual.

Las funciones que se postularon fueron la exponencial (1) y la recta (2):

$$(1) \hat{EI}_{30} \text{ mensual} = a \cdot (\text{lluvia erosiva mensual})^b$$

$$(2) \hat{EI}_{30} \text{ mensual} = a + b \cdot (\text{lluvia erosiva mensual})$$

El Cuadro N° 1 muestra los valores de los coeficientes de determinación de la función elegida en cada caso. Esta elección se hizo en base al coeficiente de determinación, excepto cuando fue mayor el de la recta y en la serie habían muchos valores bajos. La recta, normalmente no ajusta pasando por cero, como lo hace la función exponencial. Con valores bajos de la lámina mensual, al usar la recta se obtendrían valores negativos de \hat{EI}_{30} . En estos casos, se usó la función exponencial.

En general, el ajuste de las regresiones y su valor predictivo es bueno. Existen, sin embargo, algunos meses en algunas localidades en que la regresión obtenida no tiene buen valor predictivo. Se consideró que a pesar de ello, en función del objetivo de disponer de información para una larga serie de años, contemporánea entre localidades, era válido usar las regresiones obtenidas.

De esta forma, se obtuvo información basada exclusivamente en datos pluviográficos para Montevideo desde 1959 hasta 1981 y parcialmente basada en pluviógrafo y pluviómetro para el resto de las localidades desde 1955 hasta 1981. En la localidad de Treinta y Tres, se agregaron algunos años con información pluviográfica en la primera mitad del siglo.

Los valores anuales de R de toda la serie, de las distintas localidades estudiadas, se ordenaron en forma decreciente, asignándole al mayor el número de orden 1, y se calculó la probabilidad de ocurrencia con la ecuación de Kimbal (Agric. Eng. Course 428, 1975). Los valores obtenidos ajustaron muy bien a una distribución normal.

3. RESULTADOS Y DISCUSION. Si bien la distribución estacional de las tormentas

CUADRO N° 1 Coeficiente de determinación (%) de la regresión exponencial o lineal entre precipitación total mensual (incluyendo precipitaciones individuales mayores a 13mm) y EI₃₀ para la serie de años de estudio de pluviógrafo de los diferentes sitios analizados.

Meses	Estanzuela 15 años*	Paysandú 8 años*	B. Unión 11 años*	T. y Tres 15 años*	Rivera 6 años*	Paso de los Toros 7 años*
Enero	e 84,6	e 96,0	e 92,2	e 90,2	e 88,4	lin 94,1
Febrero	e 86,4	e 70,6	e 75,7	e 86,5	e 95,0	e 98,0
Marzo	e 56,2	e 62,4	e 88,4	e 82,8	e 84,6	e 50,4
Abril	e 88,4	e 86,5	e 54,8	e 84,6	e 90,2	lin 73,9
Mayo	lin 84,6	e 88,4	e 75,7	e 75,7	e 68,9	e 92,1
Junio	e 73,9	e 92,2	e 34,8	e 62,4	e 79,2	e 98,0
Julio	e 75,7	e 73,1	e 53,3	lin 81,0	e 72,2	e 84,6
Agosto	lin 75,7	e 51,8	e 79,2	e 88,4	e 98,0	e 21,2
Septiembre	lin 81,0	e 73,9	e 77,4	e 82,8	e 75,7	lin 96,0
Octubre	e 92,2	e 98,0	lin 59,3	e 73,9	e 67,2	e 27,0
Noviembre	e 79,2	e 94,1	e 92,2	e 86,5	e 82,8	e 94,1
Diciembre	e 88,4	e 77,4	e 82,8	lin 57,8	e 84,6	e 88,4

* Número de años a partir de los cuales se calculó la regresión.
 e = función exponencial de estimación del índice EI₃₀.
 lin = función lineal de estimación del índice EI₃₀.

totales es uniforme, las tormentas erosivas muestran una clara tendencia a concentrarse en los meses de primavera y verano (Cuadro N° 2). De todos los sitios estudiados, sólo en Montevideo fue algo mayor el porcentaje de tormentas erosivas en invierno.

Observando los valores del índice de erosividad de lluvia, en los siete sitios analizados (Cuadro N° 3) y su ubicación geográfica (Figura N° 1), se comprueba que crece en dirección NE, pasando de un valor de 382 en Montevideo a 779 en Rivera. Este hecho determina que las predicciones de pérdidas de suelo que arroje la ecuación universal, a igualdad de los demás factores, serán 1,21 en Treinta y Tres, 1,39 en La Estanzuela, 1,45 en Paso de los Toros, 1,72 en Paysandú, 1,79 en Bella Unión y 2,04 en Rivera, respecto a las predicciones correspondientes a Montevideo.

En el Cuadro N° 3 se observa que al ampliar la serie de años estudiadas a través de la utilización de información pluviométrica para estimar el índice, el valor promedio anual de EI₃₀ aumenta en Bella Unión, disminuye en Paysandú, Rivera y Paso de los Toros y permanece aproximadamente igual en Treinta y Tres y La Estanzuela.

Otros resultados importantes, son los altos valores de las desviaciones típicas que tienen los valores promedio anuales del índice hecho que se repite, en todas las localidades analizadas. En general, se puede establecer que el valor de EI₃₀ de un año en particular, puede superar o ser menor hasta en un 40% al valor promedio anual del índice.

En el Cuadro N° 4 se presenta la distribución estacional del índice EI₃₀.

En todas las localidades, los meses de más alto valor de EI₃₀ en promedio son Diciembre, Enero, Febrero y Marzo. En estos cuatro meses del año en La Estanzuela ocurre el 54,1% del valor anual, en Bella Unión el 46,1%, en Paysandú el 48,0%, en Treinta y Tres el 46,3%, en Montevideo el 48,1%, en Rivera el 38,1% y en Paso de los Toros el 39,7%.

El valor promedio de EI₃₀ por tormenta erosiva (Cuadro N° 5), sigue la misma distribución en el año que en EI₃₀ promedio mensual, o sea que los valores de las tormentas de primavera y verano, son los más altos. Entonces, en primavera y verano, además de registrarse un mayor número de tormentas erosivas, éstas tienen un valor promedio de EI₃₀ más alto.

CUADRO N° 2

Distribución estacional promedio de tormentas totales y erosivas en las siete localidades analizadas.

Localidad		Porcentaje que ocurre en:				Número Total
		Verano	Otoño	Invierno	Primavera	
Montevideo	TT	25,9	24,8	23,7	25,5	82,6
	TE	24,1	25,0	27,2	23,7	23,2
La Estanzuela	TT	26,2	22,7	23,7	27,3	87,4
	TE	30,3	19,7	21,7	28,3	25,7
Treinta y Tres	TT	27,9	21,0	23,1	27,9	87,0
	TE	30,0	19,8	25,9	24,3	26,3
Paso de los Toros	TT	28,0	20,5	24,5	26,9	71,0
	TE	30,8	19,8	20,2	29,4	28,2
Paysandú	TT	29,6	21,7	22,1	26,2	81,6
	TE	31,3	20,6	17,5	30,8	26,4
Bella Unión	TT	26,3	23,8	25,2	24,8	76,1
	TE	30,9	21,0	19,2	28,6	27,5
Rivera	TT	24,4	22,3	25,6	27,8	85,3
	TE	24,9	23,4	19,6	32,1	32,1

TT = Tormentas totales
TE = Tormentas erosivas

CUADRO N° 3 Promedio anual y desviación típica del índice EI₃₀ resultante de la serie de años con información pluviográfica y de ésta complementada con estimaciones a partir de información pluviométrica, para las 7 localidades estudiadas.

Estación	Serie de pluviógrafo			Serie completa (Pluviógrafo y estimación pluviométrica)		
	EI ₃₀ Promedio Anual	Desviación Típica	N° de años	EI ₃₀ Promedio Anual	Desviación Típica	N° de años
Montevideo	382	193	23	382	193	23
La Estanzuela	524	192	15	532	179	27
Treinta y Tres	466	257	15	462	199	33
Paso de los Toros	610	303	7	554	252	27
Paysandú	709	245	8	659	236	27
Bella Unión	642	224	12	685	245	27
Rivera	930	456	6	779	351	27

CUADRO N° 4

El₃₀ promedio mensual como porcentaje del El₃₀ promedio anual para los sitios analizados.

MES	La Estanzuela (1)	Bella Unión (1)	Paysandú (1)	Treinta y Tres (2)	Montevideo (3)	Rivera (1)	Paso de los Toros (1)
Enero	12,7	10,6	9,5	12,7	12,2	10,0	11,3
Febrero	12,8	9,9	14,0	12,9	15,2	8,8	10,0
Marzo	14,3	13,6	11,4	8,4	11,1	9,2	9,4
Abril	7,6	8,7	9,2	5,7	7,6	12,1	12,1
Mayo	4,3	6,3	3,4	7,1	6,3	4,9	9,1
Junio	3,6	3,2	4,6	5,6	4,8	8,7	5,5
Julio	2,9	1,9	4,1	8,4	5,6	3,1	5,4
Agosto	5,0	5,1	4,6	4,1	6,3	2,6	4,1
Setiembre	5,7	6,9	5,4	7,0	7,2	9,4	6,7
Octubre	9,3	11,8	13,2	6,7	7,6	13,7	9,0
Noviembre	7,5	9,9	7,5	9,1	6,5	7,4	8,3
Diciembre	14,3	12,0	13,1	12,3	9,6	10,1	9,0

- (1) (Serie 1955/81. Resultados de lectura de bandas de pluviógrafo complementados con estimaciones del índice a partir de información pluviométrica).
 (2) (Serie 1955/81. Resultados de lectura de bandas de pluviógrafo complementados con estimaciones del índice a partir de información pluviométrica Serie 1917/20, 1923/24 de información pluviográfica).
 (3) (Serie 1959/81. Resultados de la lectura de bandas pluviógrafo).

CUADRO N° 5

El₃₀ promedio para cada tormenta de cada mes como porcentaje del El₃₀ promedio anual para los sitios analizados.

MES	La Estanzuela*	Bella* Unión	Faysandú*	Treinta y Tres	Montevideo	Rivera	Paso de los Toros
Enero	5,3	4,5	3,6	2,8	4,3	2,5	3,5
Febrero	5,3	5,0	4,1	6,4	7,6	2,0	3,0
Marzo	6,5	3,8	5,0	3,3	5,3	2,6	4,0
Abril	2,3	4,1	4,5	3,4	3,3	7,8	4,7
Mayo	2,6	3,4	1,9	2,3	2,4	1,6	3,3
Junio	2,5	1,5	2,4	2,4	2,5	2,3	0,7
Julio	1,7	1,2	2,0	3,0	2,2	1,4	1,6
Agosto	2,3	3,4	2,2	1,8	2,5	0,4	2,6
Setiembre	3,2	2,4	3,1	3,9	3,1	2,5	2,1
Octubre	3,3	2,9	4,5	1,3	2,9	3,3	4,1
Noviembre	4,2	3,7	4,8	3,7	3,4	4,9	4,3
Diciembre	4,8	5,4	4,5	4,5	5,9	3,0	3,1

*Rovira et al (1982).

(Resultados obtenidos de la lectura de bandas de pluviógrafo).

Rojas y Conde (1980) determinaron el valor del factor R de la ecuación universal, para diferentes localidades de Argentina. De su información surge lo siguiente:

El valor del índice EI_{30} presentado para Concordia (Entre Ríos) de 671, se corresponde con los valores del índice determinados al sur en Paysandú (659) y al norte en Bella Unión (685).

El valor del índice de erosividad determinado en El Palomar (Buenos Aires) de 509, se corresponde con el del sitio más cercano en Uruguay (La Estanzuela, 532).

Solamente el valor de 527 de Gualaguaychú (Entre Ríos), es ligeramente inferior al que se esperaba en función de su ubicación y de los valores de los sitios más cercanos (659 en Paysandú, al norte y 532 en La Estanzuela, al sur).

A partir de los valores del índice R calculados en Uruguay y los presentados por Rojas y Conde (1980) para una importante región de la Argentina, se construyó un mapa tentativo de isolíneas que unen puntos de igual potencialidad erosiva de las lluvias en Uruguay (Figura N° 1).

4. CONCLUSIONES.

El Índice de Erosividad de las lluvias (EI_{30}) crece hacia el Norte del País.

En promedio, el valor de EI_{30} de las localidades ubicadas al norte del Río Negro, es un 47% mayor al correspondiente al valor de las localidades analizadas al sur. A igualdad de los demás factores, las estimaciones de pérdida de suelo con la ecuación universal, serán 1.21 en Treinta y Tres, 1,39 en La Estanzuela, 1,45 en Paso de los Toros, 1,72 en Paysandú, 1,79 en Bella Unión y 2,04 en Rivera, en relación a las estimaciones en Montevideo.

Se debe manejar con precaución el valor promedio anual de EI_{30} porque manifiesta una gran variación entre años.

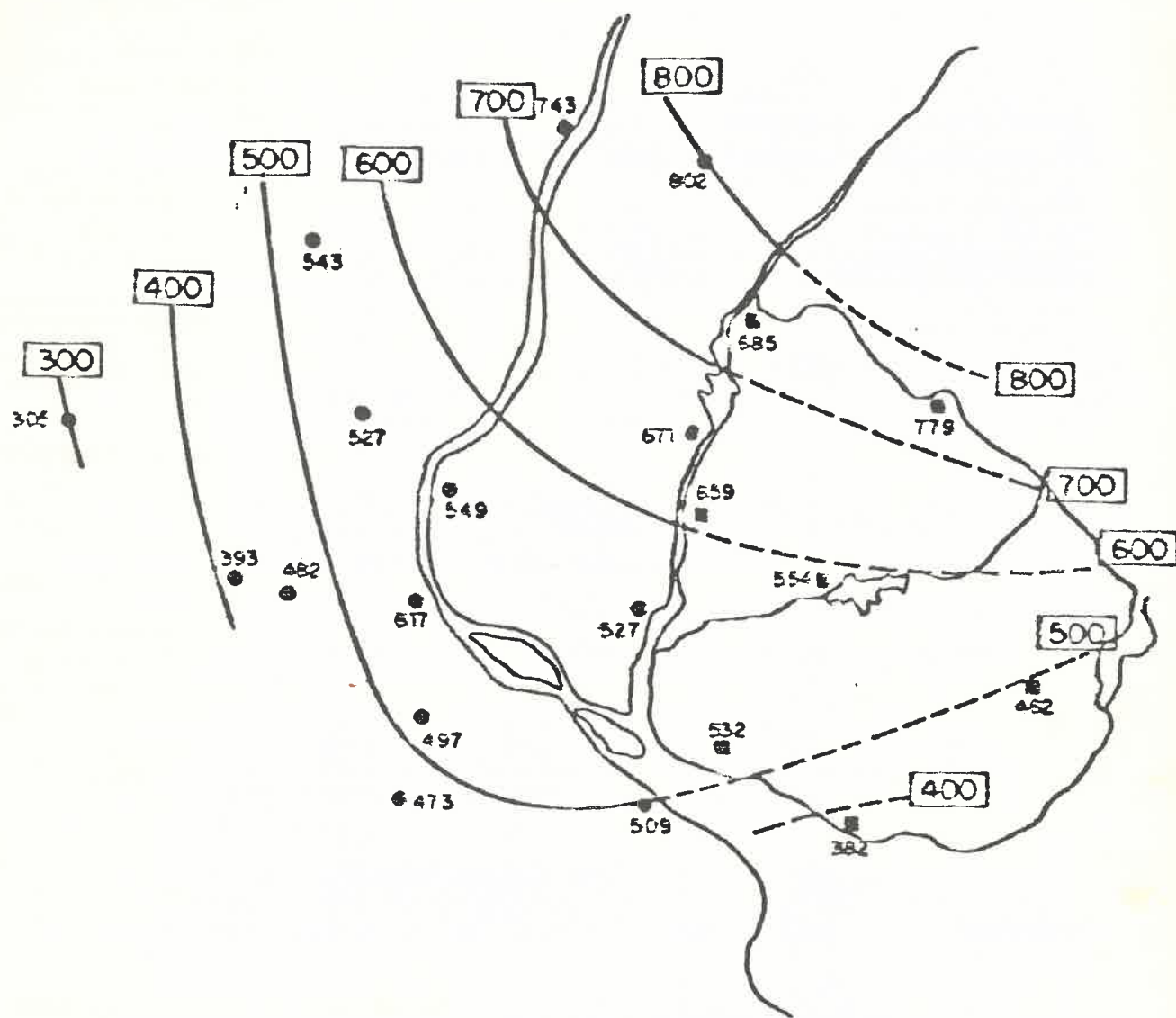
El valor de EI_{30} anual tiene una definida distribución estacional, registrándose los valores más altos en los meses de primavera y verano.

La distribución estacional del índice es similar en todo el país.

La variación estacional del índice EI_{30} concentrándose en primavera y verano, responde a una mayor concentración de lluvias de alta intensidad, que determina mayor cantidad de tormentas erosivas y mayor erosividad de cada tormenta.

La distribución espacial del valor de EI_{30} promedio anual, representada por el mapa tentativo de isoerodentas, tiene una tendencia comparable al mapa de isoyetas del país.

Si bien se entiende que el valor promedio anual de EI_{30} debe utilizarse como el "factor lluvia" de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, su validez debe comprobarse experimentalmente para las condiciones de Uruguay.



REFERENCIAS:

● y — Rojas y Conde (1980)

497 532
● y ■ El número indica el valor promedio anual del EI₃₀ estimado para la localidad.



ESCALA: 1:6.500.000

FIGURA Nº 1 Mapa tentativo de isoerodentas de Uruguay y parte de Argentina. (factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo).

REFERENCIAS

AGRICULTURAL ENGINEERING COURSE 428 (1975). Hydrologic Frequency Analysis. - Texas A e M University.

CARTER, C.E. et al. Raindrop characteristics in South Central United States. - American Society of Agricultural Engineers Transactions. 17:1033 - 1037. 1974.

CASTRO FILHO et al. Erosividade das chuvas para alguns locais do Estado do Paraná, usando cálculos manuais e processamento eletrônico de dados. II Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo. Anais - Passo Fundo. 1978. p 167 - 174.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. La Erosión del Suelo por el Agua. Algunas Medidas para combatirla en las Tierras de Cultivo. Cuaderno de Fomento Agropecuario Nº 81. Roma. 1967.

GARCIA, F. Predicción de Pérdidas de Suelo por Erosión Hídrica. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Montevideo 1982 57p.

PUNTES, R. A framework for the use of the Universal Soil Loss Equation in -- Uruguay. M.Sci. Thesis, Texas A & M University, 1981.

_____; Szögi, A. Manual para la utilización de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo en el Uruguay. Serie: Normas técnicas en conservación de suelos Nº 1. Dirección de Suelos MAP. Montevideo-Uruguay. -- 1983.

ROJAS, A.; CONDE, A. Determinación del Índice de Erosividad de las Lluvias -- (1era. aproximación). IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Paraná. 1980.

ROVIRA, L. et al. Erosividad de Lluvias en las Zonas de Influencia de las Estaciones Agroclimáticas La Estanzuela, Paysandú, Bella Unión y Treinta y Tres. MAP-IIICA 1982. 15p.

WISCHMEIER, W.; SMITH, D. and UHLAND, R. Evaluation of factors in the Soil Loss Equation. Agr. Eng. 39:458-462. 1958.

_____; and SMITH, D. Rainfall Energy and its Relationship to soil loss. Trans. Amer. Geophys. Union 30:285-291. 1958.

_____; A. Rainfall Erosion Index for a Universal Soil Loss Equation, - Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23:246-249. 1959.

_____; and SMITH, D. A Universal Soil - Loss Equation to Guide Conservation Farm Planning. Trans of 7 th. Inter. Cong. of Soil Sci, Vol. 1 paper 2. Madison, Wisconsin. 1960.

_____; and SMITH, D. Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains. Agric. Res. Sew., USDA, Agri. Handbook Nº 282. - 1965. 47p.

_____; and MANNERING, J. Relation of Soil Properties to its Erodability, Soil Sci.Soc. Amer. Proc. 33:131 - 137.

_____ ; and SMITH, D. Predicting rainfall erosion losses a guide to
conservation planning. US Department of Agriculture. Handbook N^o -
537. 1978. 57p.

PRIMER TALLER NACIONAL DE INVESTIGACION SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES

Cooperación Bilateral Uruguay-Estados Unidos

CARACTERIZACION E INSTRUMENTACION DE DOS
CUENCAS EN EL URUGUAY

Ing. Agro. Julio C. Pannone
Ing. Agro. Ariel Szogi

Montevideo-Uruguay

CARACTERIZACION E INSTRUMENTACION DE DOS CUENCAS EN EL URUGUAY

J. Pannone
A. Szogi

1. INTRODUCCION

El Acuerdo de Colaboración Recíproca entre el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), la Dirección de Suelos (DS/MAP), la División Uso y Manejo del Agua (DUMA/MAP) y el Instituto Nacional de Colonización (INC), en materia de Manejo y Conservación de Tierras y Aguas, ha iniciado estudios referentes a la futura instalación de cuencas experimentales en el país.

Una de las primeras etapas del mencionado estudio, es realizar la caracterización de dos cuencas, para analizar posteriormente, la factibilidad de su puesta en funcionamiento bajo el carácter de experimentales.

La información que se obtendrá de dichas cuencas experimentales, será de máxima utilidad para un planeamiento eficaz en materia de manejo y conservación de tierras y aguas en el país.

2. OBJETIVOS

El presente trabajo consiste en realizar el estudio preliminar de las características de dos pequeñas cuencas agrícolas y presentar la instrumentación básica necesaria para que dichas cuencas funcionen en un futuro bajo el carácter de cuencas experimentales.

La elección de dichas cuencas, se condicionó a la ubicación de Estaciones Experimentales del Ministerio de Agricultura y Pesca.

Las cuencas seleccionadas, se ubican en las áreas geográficas de Aguas Blancas (Depto. de Lavalleja) y de La Estanzuela (Depto. de Colonia).

3. CARACTERISTICAS DE AMBAS CUENCAS

3.1. Cuenca de Aguas Blancas

Ubicación: Localidad Aguas Blancas, Depto. Lavalleja; 100 Km de Montevideo, 30 Km de Minas, pertenece al sistema hidrológico de la Cuenca del arroyo Solís Grande, 34°30' latitud S, 55°30' longitud O. Area 272 há.

Clima: La temperatura media anual fluctua entre 16.5 y 17.0 °C. Se observan los siguientes promedios estacionales: Otoño 17.5 a 18.0 °C, Invierno 12.0 a 12.5 °C, Primavera 16 °C y Verano 22.5 °C (2).

La precipitación media anual es 1001 mm. La precipitación media mensual del período 1915-1980 es: Enero 92 mm, Febrero 78, Marzo 85, Abril 79, Mayo 84, Junio 105, Julio 80, Agosto 86, Setiembre 85, Octubre 75, Noviembre 76, y Diciembre 76 mm (DNM).

La evapotranspiración mensual estimada por el método de Thornwaithe es la siguiente: Enero 132 mm, Febrero 103.0, Marzo 96.0, Abril 62.0, Mayo 40.0, Junio 25.0, Julio 26.0, Agosto 31.0, Setiembre 41.0, Octubre 64.0, Noviembre 86.0 y Diciembre 115 mm (3).

Geología: Zócalo de la cuenca del Río de la Plata (Proterozoico inferior), son rocas cristalinas predominando gneisses de grano medio a grueso (1-3 mm) homogéneo. Asociado a éste aparecen filones de pegmatitas concordantes o discordantes (13).

Malvín (Plio-Pleistoceno), formado en base a materiales provenientes de Sierra de Animas (Cámbrico Ordovícico), cantos de traquitas, riolitas, sienitas y rocas básicas englobadas en una matriz arenosa y arcillosa, siendo subangulares y dispuestas en niveles mal definidos.

Libertad (Holoceno) posee composición litológica homogénea, son rocas limosas (lodolita) con más de 1% de arena gruesa y gravillas de tamaño menor a 5 mm, rica en carbonato de calcio (6).

Dolores, retransporte de Libertad apareciendo en terrazas en los entalles de los cursos de agua.

Aluviones recientes, sedimentos recientes ubicados junto a los cursos de agua.

Suelos: Profundos, oscuros, de textura pesada y algo pesadas, permeabilidad lenta. Inceptisol Melánico LAC (Typic Hapludoll) 3%, Brunosol Eutrítico Típico LAC (Typic Arguidoll) 56%, Brunosol Eutrítico Típico LAC (Acquic Arguidoll) 21%, Vertisol Rúptico Lúvico LAC (Typic Pelludert) 20% (Ver Figura 1).

Erosión: Fase e₀ 36%, fase e₁ 35%, fase e₂ 24% y fase e₃ 5% (Ver Figura 1).

Capacidad de uso: Clase II 40%, Clase III 52%, Clase IV 3%, y Clase VI 5% (Ver Figura 2).

Topografía: La cuenca tiene forma "arriñonada", con índice de forma SH_{B1} = 3.31 (11), índice de elongación SH_{B2} = 0.62 (10). Altitud máxima y mínima, 99 y 76 m resp (Ver Figura 3). La Figura 4 corresponde a la curva de pendiente media y la Figura 5 a la curva hipsométrica (5).

Drenaje superficial: Largo de la vía principal 2.7 Km, número total de vías 16, número de hectáreas por vía 17, densidad de drenaje 36, relación de drenaje 0.12 (Ver Figura 6).

Esguerrimiento Superficial: Tiempo de concentración 61 minutos (fórmula de Benham) (7), máxima intensidad de lluvia en el tiempo de concentración 65 mm/h con período de retorno de 30 años y un riesgo estadístico del 10% (9), máximo caudal de esguerrimiento 30 m³/seg (fórmula de Ramser, con c = 0.61 según Gunnedah) (7).

Condición de la cuenca: Fruticultura 8%, horticultura 6%, agricultura 17%, área experimental 4%, área de pastoreo 65% (Ver Figura 7).

Instrumentación necesaria: 1 vertedero triangular del tipo 5:1, 1 limnógrafo de cinta semanal marca Alpina Hydrometrie (14), 1 limnómetro de máxima (14), 1 molinete marca Ott (14), 1 escala de 2 m graduada al centímetro, 1 muestreador automático de sedimentos, 1 muestreador de sedimentos tipo US DH 48 o US 49, 7 pluviómetros marca Lambrecht (DNM) distribuidos según patrón hexagonal (15); 1 pluviógrafo a ubicar en el centro de la cuenca (15); 1 sonda de neutrones y tubos de acceso.

3.2. Cuenca de La Estanzuela

Ubicación: Estación Experimental "La Estanzuela" (MAP), Departamento de Colonia; 170 kilómetros de Montevideo, 25 kilómetros de la Capital departamental; 34°20' latitud S, 57°41' longitud NO. Área 91 hás.

Clima: La temperatura media anual es de 17.8°C. Se observan los siguientes promedios estacionales: Otoño 15.2°C, Invierno 12.9°C, Primavera 20°C y Verano 23.2°C.

La precipitación media anual es 1080 mm. La precipitación media mensual del período 1948-1967 es: Enero 92 mm, Febrero 72 mm, Marzo 104mm, Abril 100mm, Mayo 80 mm, Junio 72 mm, Julio 65 mm, Agosto 74 mm, Setiembre 85 mm, Octubre 75 mm, Noviembre 82 mm y Diciembre 70 mm.

Los valores medios mensuales de E₀ de Penman para el período 1966-1972 son: Enero 193 mm, Febrero 155, Marzo 126, Abril 76, Mayo 47 Junio 29, Julio 35, Agosto 55, Setiembre 85, Octubre 117, Noviembre 156, y Diciembre 197 mm (4).

Geología: Zócalo de la cuenca del Río de la Plata (Proterozoico inferior), el área de la cuenca forma parte de un enorme batolito granodiorítico de anatexis que conserva restos aislados no granitizados de cuarcitas, anfibolitas y micaesquistos, que determinan estructuras migmáticas (1).

Libertad (Holoceno), iguales características que en la cuenca de Aguas Blancas y es el principal material madre de los suelos que componen la cuenca.

Suelos: Texturas pesadas y algo pesadas, permeabilidad lenta. Bruno sol Eutrico Típico LAC (Typic Argiudoll) 67%, Planosol Eutrico Melánico LAC (Typic Argiudoll) 10%, Vertisol Rúptico Lúvico LAC (Typic Pelludert) 17%, Brunosol Eutrico Lúvico LAC sd (Typic Argiudoll) 6%. (Ver Figura 8).

Erosión: Fase e₀ 25%, fase e₁ 67%, fase e₂ 8% (Ver Figura 8).

Capacidad de Uso: Clase II 16%, Clase IIe 68%, Clase IIIh 9%, Clase IV se 7% (Ver Figura 8).

Topografía: Índice de forma SH B1 = 1.14 (11), índice de elongación SH B2 = 1.06 (10). Altitud máxima y mínima, 83 y 60 m resp (Ver Figura 9). La Figura 10 corresponde a la curva de pendiente media y la Figura 11 a la curva hipsométrica (5).

Drenaje superficial: Largo de la vía principal 1.02 kilómetros, número total de vías 4; número de hectáreas por vía 23; densidad de drenaje 27; relación de drenaje 0,10 (Ver Figura 12).

Escorrentamiento superficial: Tiempo de concentración 17 minutos (fórmula de Benham (7), máxima intensidad de lluvia en el tiempo de concentración 110 mm/h con un período de retorno de 20 años (8), máximo caudal de escorrentamiento 16.4 m³/seg (fórmula de Ramser, c = 0,59 según Gunnedah) (7).

Condición de la cuenca: Avena rye grass 25%; pradera convencional 27%; trébol blanco 9%; lotus alfalfa 7%; terreno arado 19%; campo natural de bajo 13%; área experimental 1%.

Instrumentación necesaria: 1 canal HL (12); 1 limnógrafo de cinta semanal marca Alpina Hydrometrie (14), 1 limnómetro de máxima (14), 1 molinete marca Ott (14), 1 escala de 2 m graduada al centímetro, 1 muestreador automático de sedimentos, 1 muestreador de sedimentos tipo US DH 48 o US 49, 6 pluviómetros marca Lambrecht (DNM) distribuidos según patrón hexagonal (15); 1 pluviógrafo a ubicar en el centro de la cuenca (15); 1 sonda de neutrones y tubos de acceso.

REFERENCIAS

- (1) Bossi, J. y Galípolo, N.
Informe sobre la estructura geológica de la zona de La Estanzuela, Depto. Colonia, Facultad de Agronomía, Cátedra de Geología, Montevideo, 1965.
- (2) Cátedra de Ecología
Curso de Ecología. Tomo I. Atlas climatológico del Uruguay. Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay, 1974 . 68 pp.
- (3) Estol, E. y Perdomo, I.
Sistema Experimental de riego A-1 Aguas Blancas. Lavalleja. Estudio Económico y Social de su área de Influencia. MAP Dirección de Uso y Manejo del Agua. IICA .1976. 65 pp.
- (4) Henry, J.
Estudios sobre evapotranspiración. UNESCO. Montevideo, 1974
- (5) Heras, R.
Las cuencas Representativas y Experimentales. Guía internacional en materia de conservación. Centro de Estudios hidrográficos. UNESCO, 1970. 598 pp.
- (6) Prost, M.T.
Heritages quaternaires et evolution geomorphologie des Bords du Rio de la Plata en Uruguay. Thèse de Doctorat en Géomorphologie, Tome 2, París, 1982.
- (7) Puricelli, E.
Evaluación de la escorrentía para cuencas reducidas. Conservación de suelos y aguas. Año 2 . N°3. Boletín de los Recursos Naturales Renovables. Secretaría de Agricultura y Ganadería Argentina, 1983

(8) Rovira, L. et al.
 Intensidad máxima y erosividad de lluvias en el área de influencia de la Estación Agroclimática "La Estanzuela". MAP-IICA, 1981
 24 p.

(9) Rodríguez Fontal, A.
 Ecuaciones y ábacos para drenaje, desague de aeropuertos, autopistas y zonas urbanas, diques de tierra y defensa ante inundaciones Boletín de Facultad de Agronomía. Universidad de la República, Montevideo. Uruguay, 1980, p 188.

(10) Schumm, S.A.
 Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, N.J. Geol. Soc. of. Am. Bull. V 67 mo 5, p 597-646. 1956.

(11) U.S. Corp of Engineers. 1963.
 Unit hydrographs, part I, principles and determinations. Baltimore, U.S. Army Engr. Dist.

(12) U.S. Department of Agriculture. (1979)
 Field Manual for Research in Agricultural Hydrology. Agriculture Handbook 224. 550 p.

(13) Uruguay
 Conservación y mejora de playas . URU 73.007 MTOP-UNESCO

(14) Arduino, G. Com.pers.

(15) Smith, F. Com. pers.

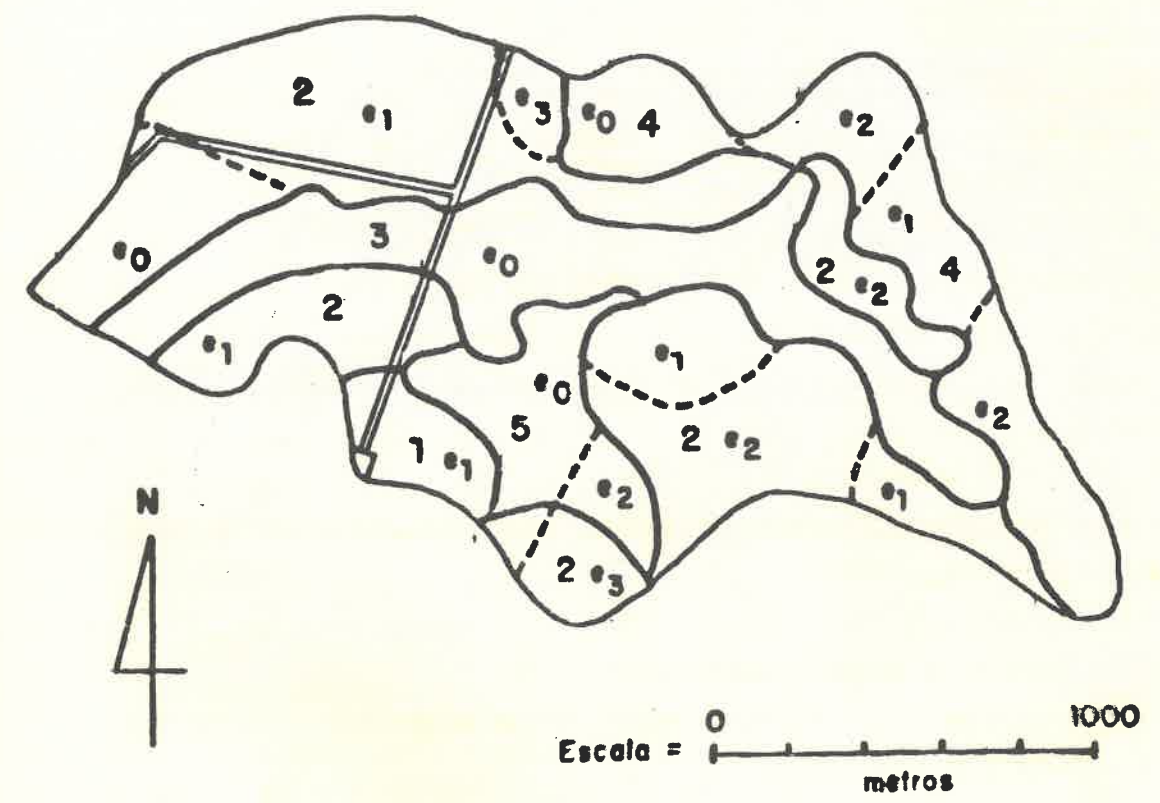
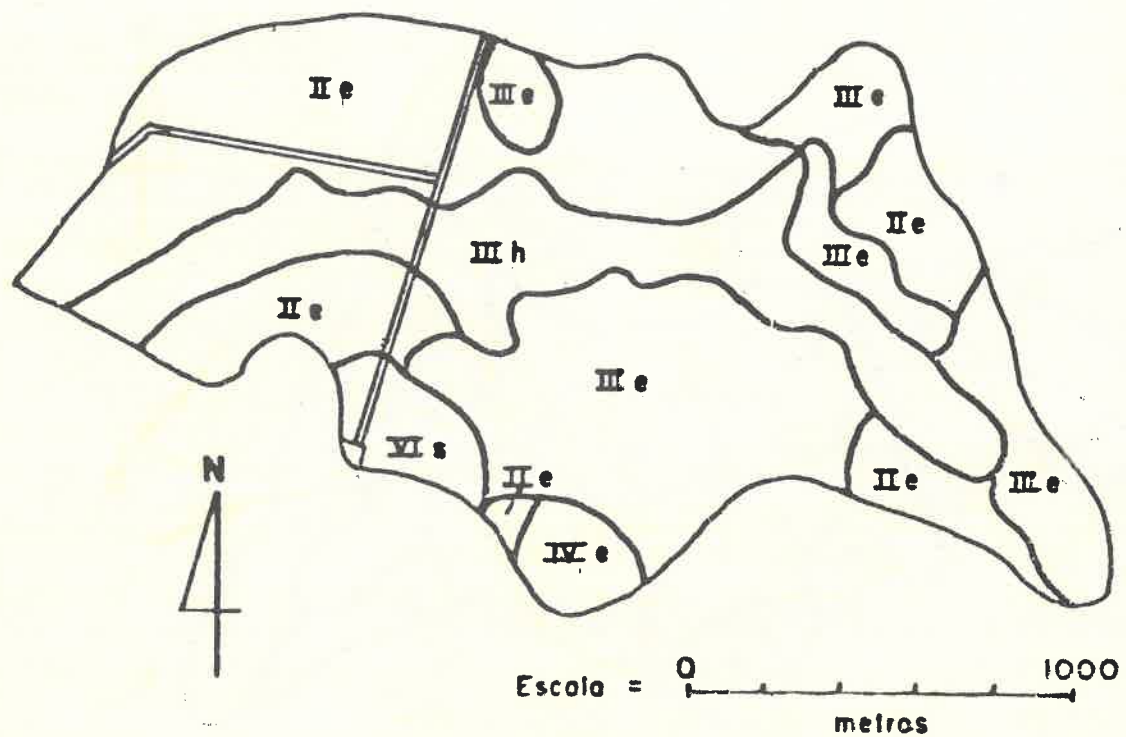


Figura Nº 1: Mapa edafológico compilado y fases de erosión de la cuenca de "Aguas Blancas".

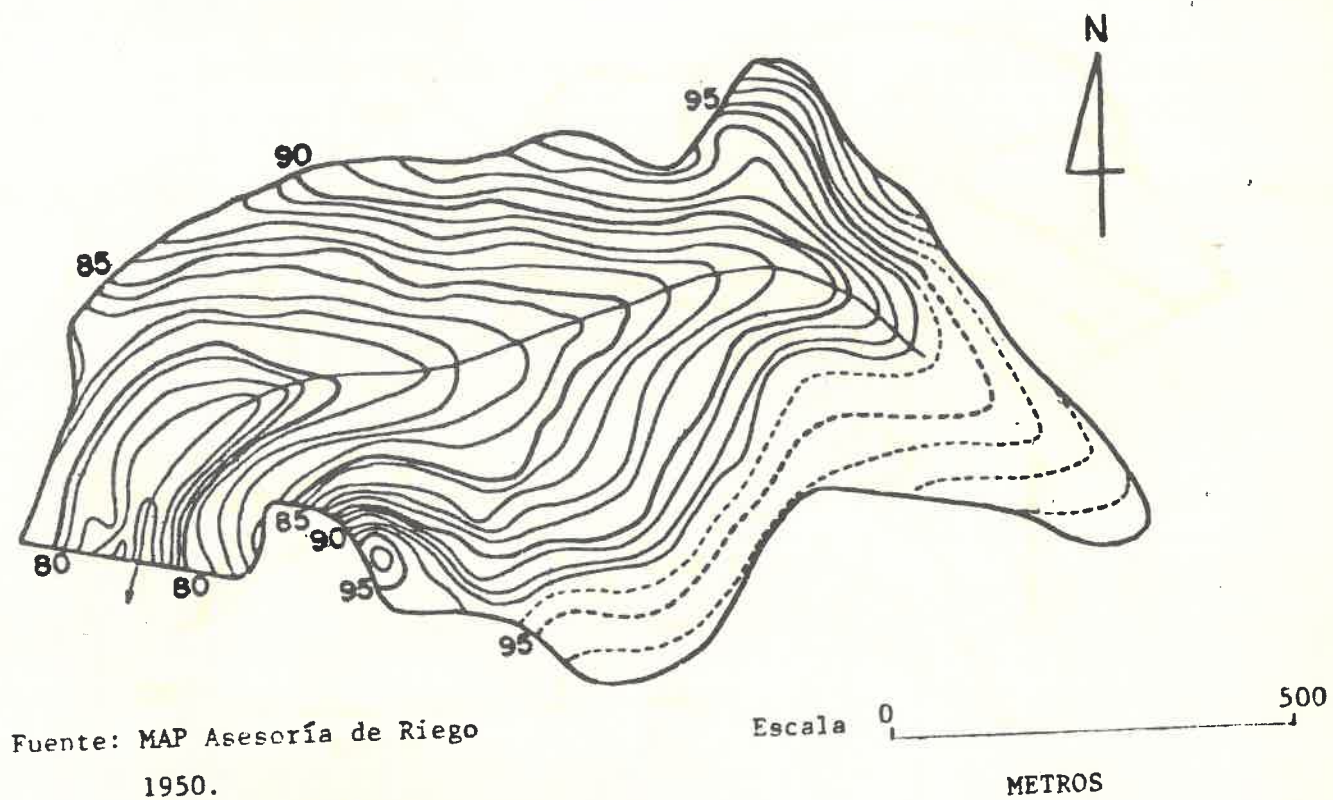
- | | |
|---|---|
| <p>Suelos:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 - Inceptisol Melánico. 2 - Brunosol Eútrico Típico LAc. 3 - Brunosol Eútrico Típico LAc h. 4 - Vertisol Rúptico Lúvico LAc. 5 - Brunosol Eútrico Típico LAc. | <p>Erosión:</p> <ul style="list-style-type: none"> e₀ - Nula. e₁ - Ligera. e₂ - Moderada. e₃ - Severa. e₄ - Muy severa. |
|---|---|



Clases de uso:

- II e - Moderadas limitaciones respecto al cultivo, cierto riesgo de erosión.
- III h - Severas limitaciones por problemas de drenaje.
- III e - Severas limitaciones por riesgo de erosión.
- IV e - Muy severas limitaciones por riesgo de erosión.
- VI s - Restricciones permanentes severas al uso por pendientes fuertes y suelos poco profundos.

Figura N°2: Mapa de capacidad de uso de los suelos de la cuenca de "Aguas Blancas".



Fuente: MAP Asesoría de Riego 1950.

Figura N°3: Altimetría de la cuenca de "Aguas Blancas".

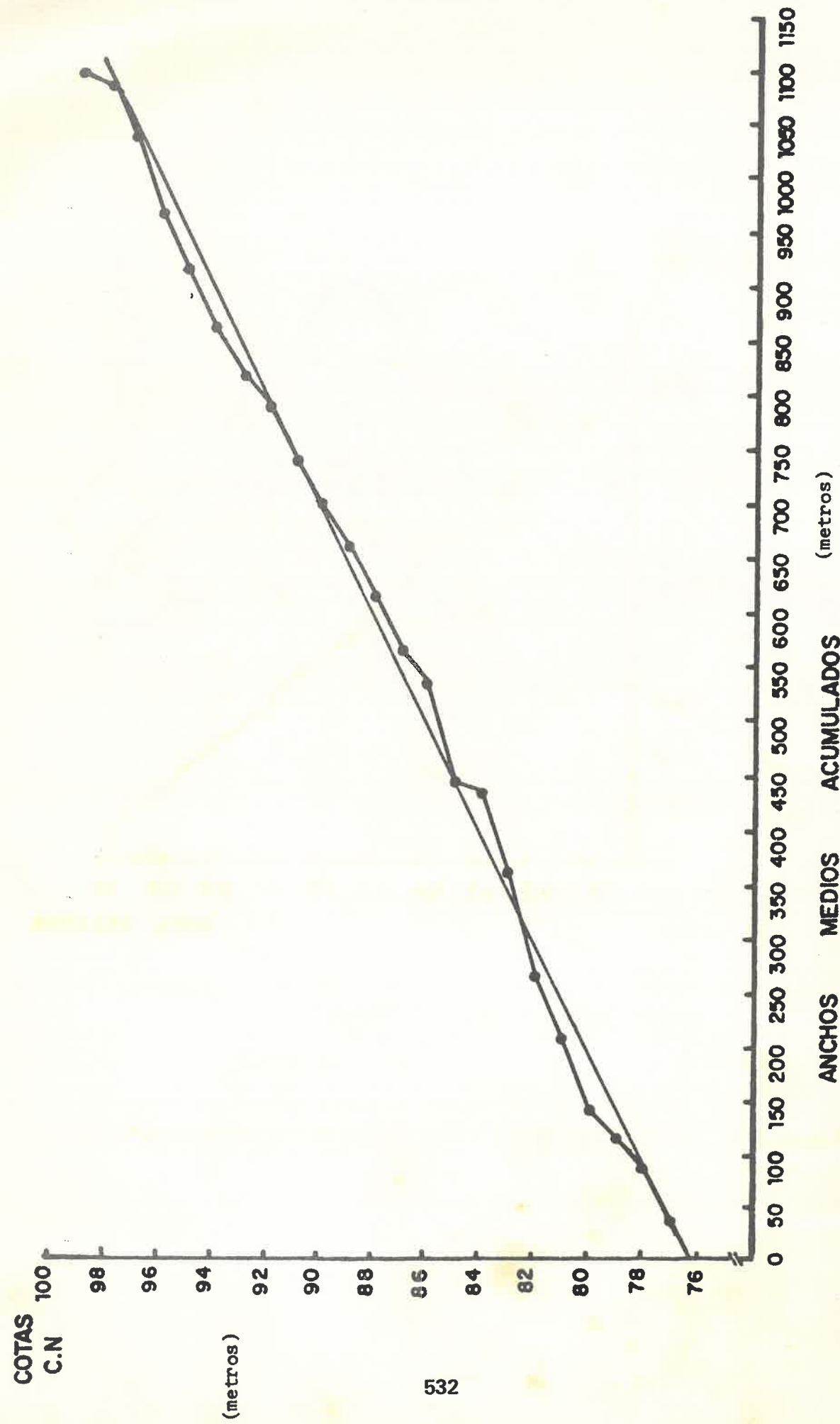


Figura N°4: Curva de pendiente media de la cuenca de "Aguas Blancas".

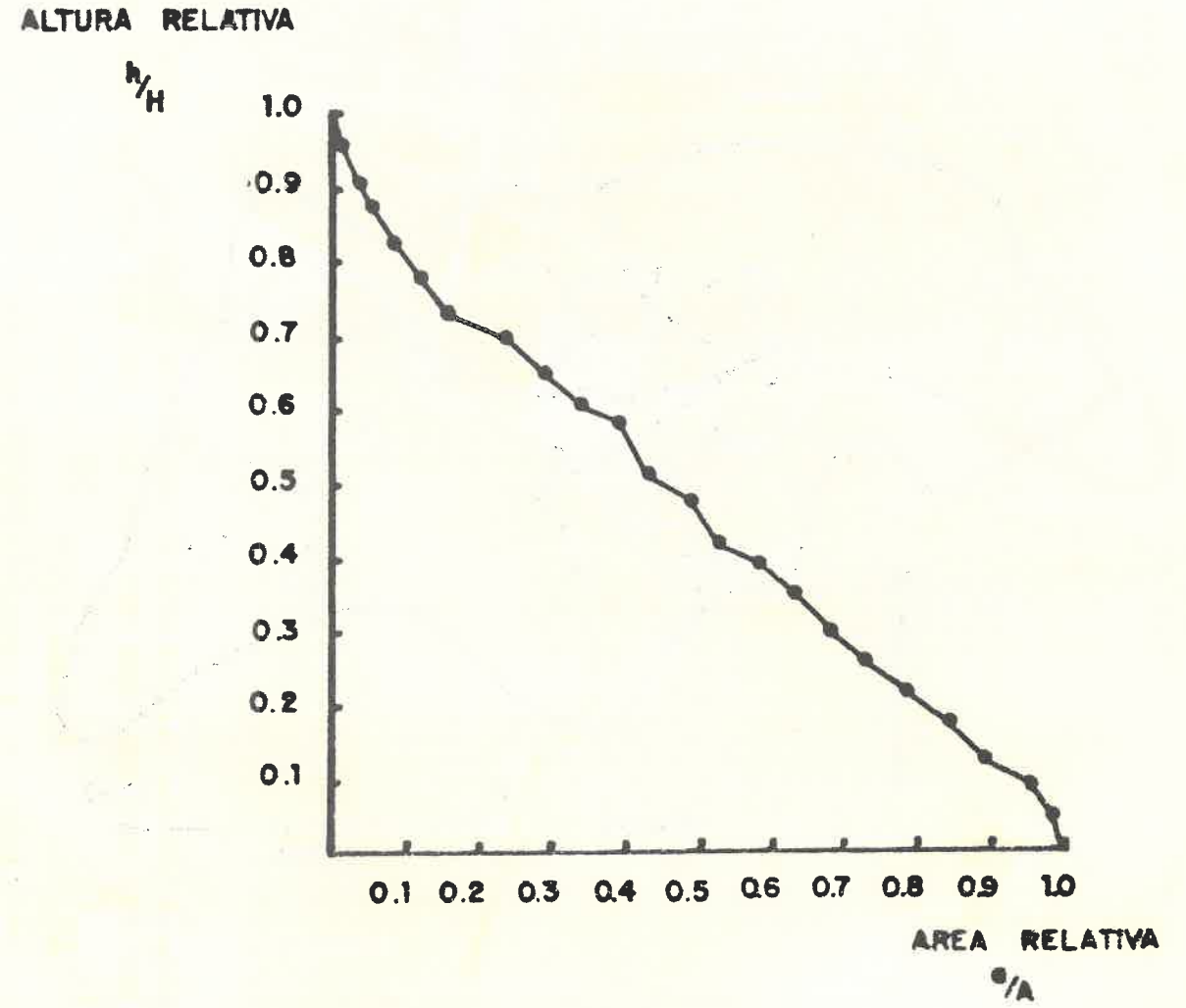


Figura N°5: Curva hipsométrica de la cuenca de "Aguas Blancas".

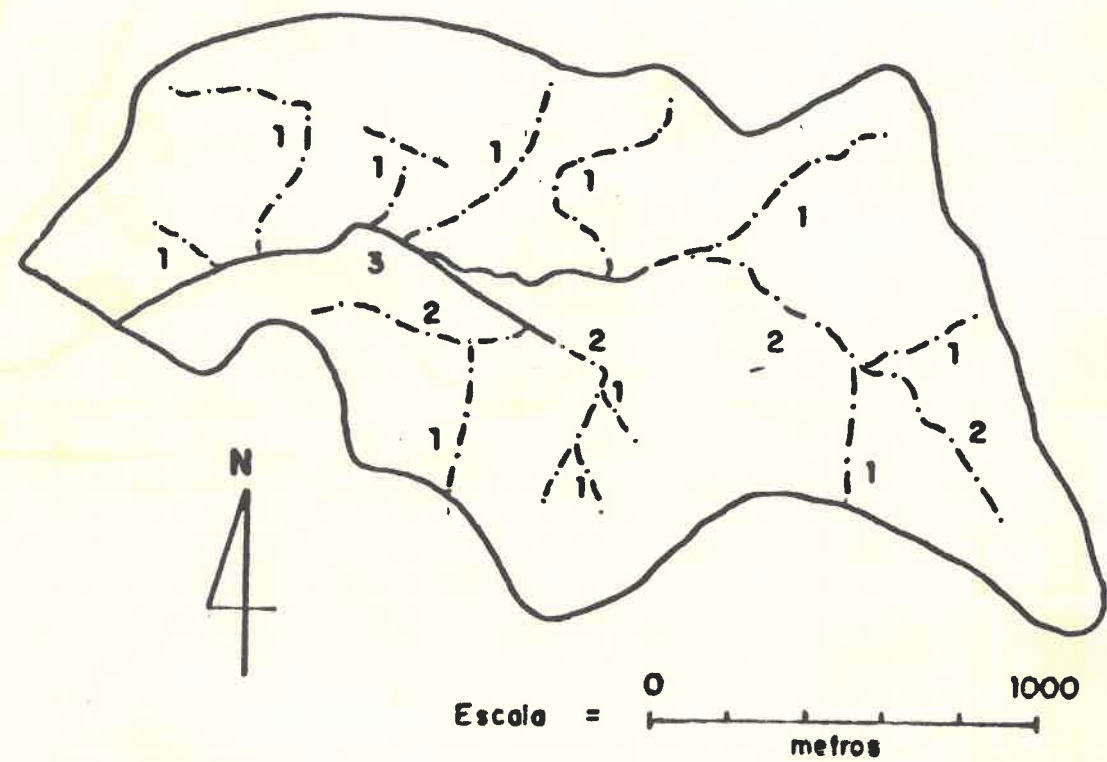
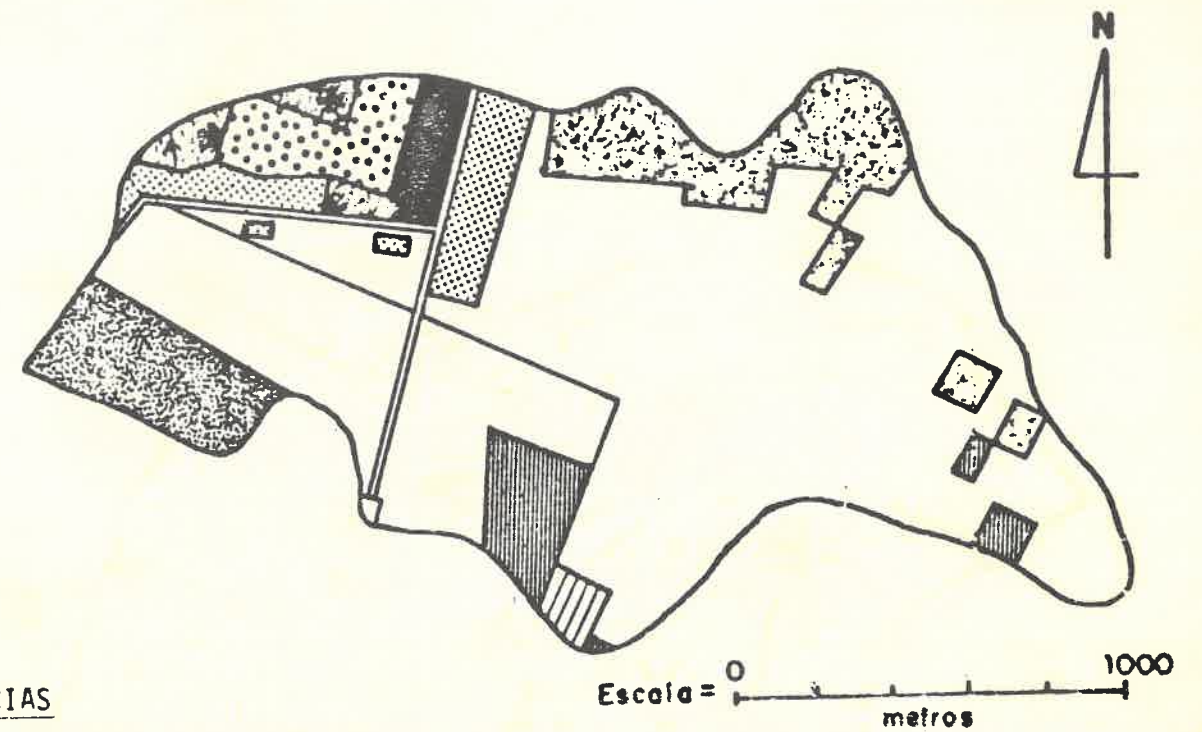


Figura N°6: Red de drenaje de la cuenca de "Aguas Blancas".
(los números corresponden al orden de la vía de drenaje de acuerdo al sistema de Strahler).



REFERENCIAS









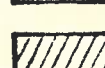
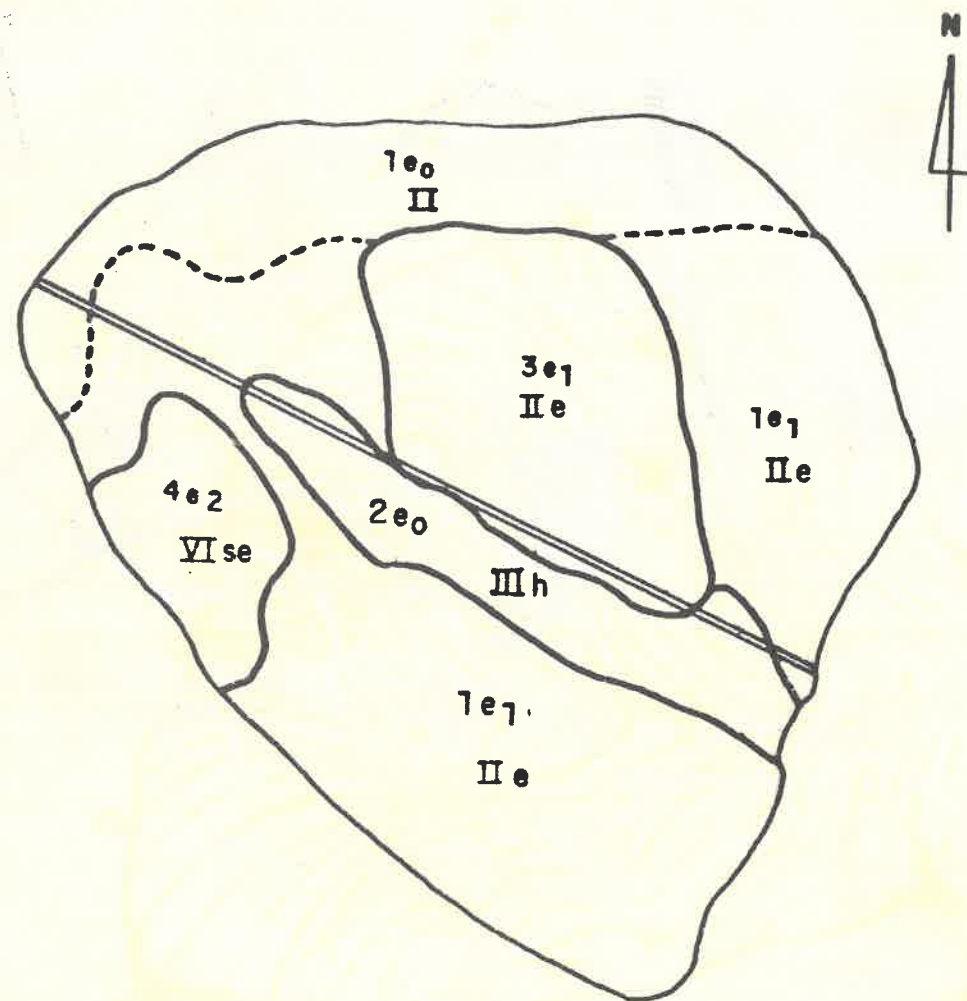
-  Area de pastoreo
-  Citrus
-  Manzanos
-  Durazneros
-  Area Experimental
-  Horticultura
-  Barbecho
-  Cultivos (avena, trigo, etc.)
-  Rastrojo

Figura N°7: Mapa de uso actual de la cuenca de "Aguas Blancas", (Mayo, 1983).



Suelos:

- 1 - Brunosol Eútrico Típico LAc.
- 2 - Planosol Eútrico Melánico LAc.
- 3 - Vertisol Rúptico Lúvico LAc.
- 4 - Brunosol Eútrico Lúvico LAc sd.

Figura N°8: Mapa edafológico, fases de erosión y capacidad de uso de los suelos de la cuenca de "La Estanzuela".

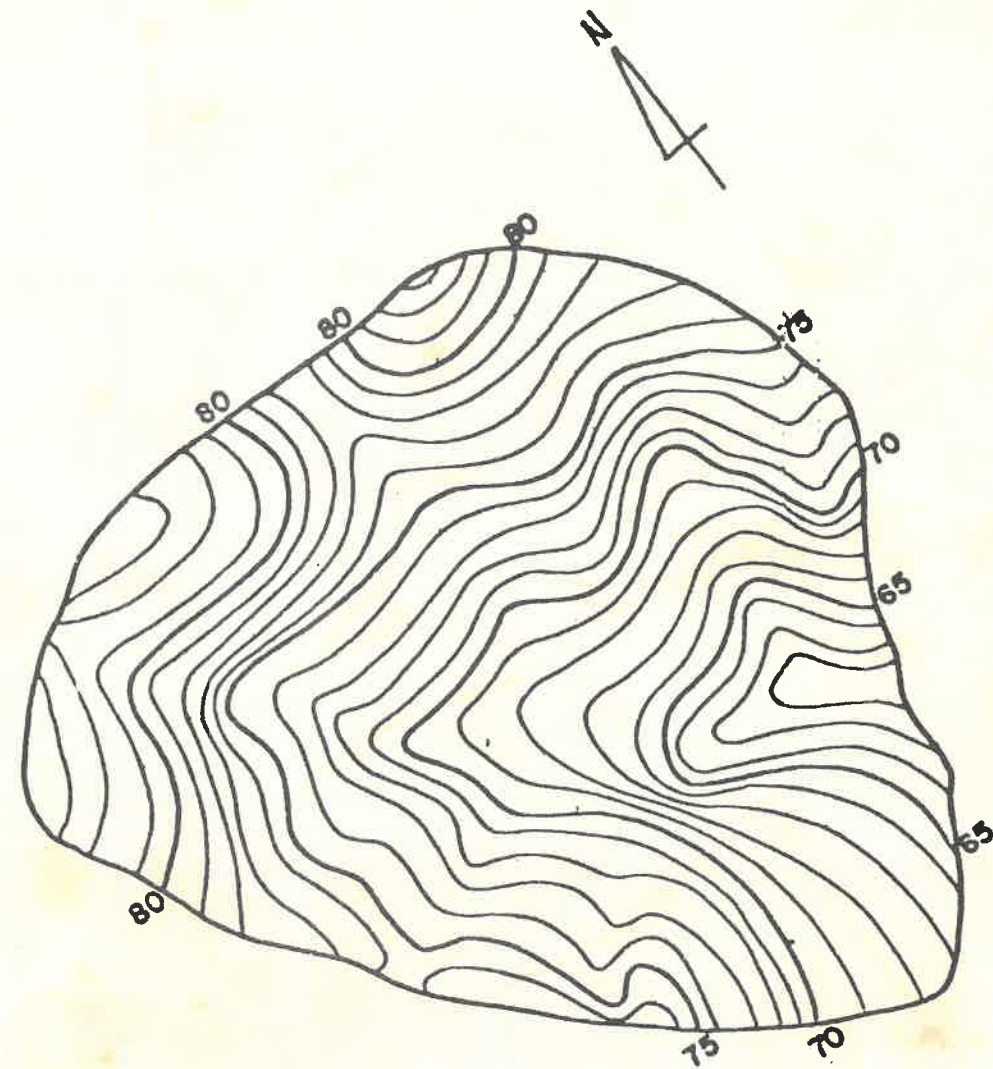


Figura N°9: Altimetría de la cuenca de "La Estanzuela".

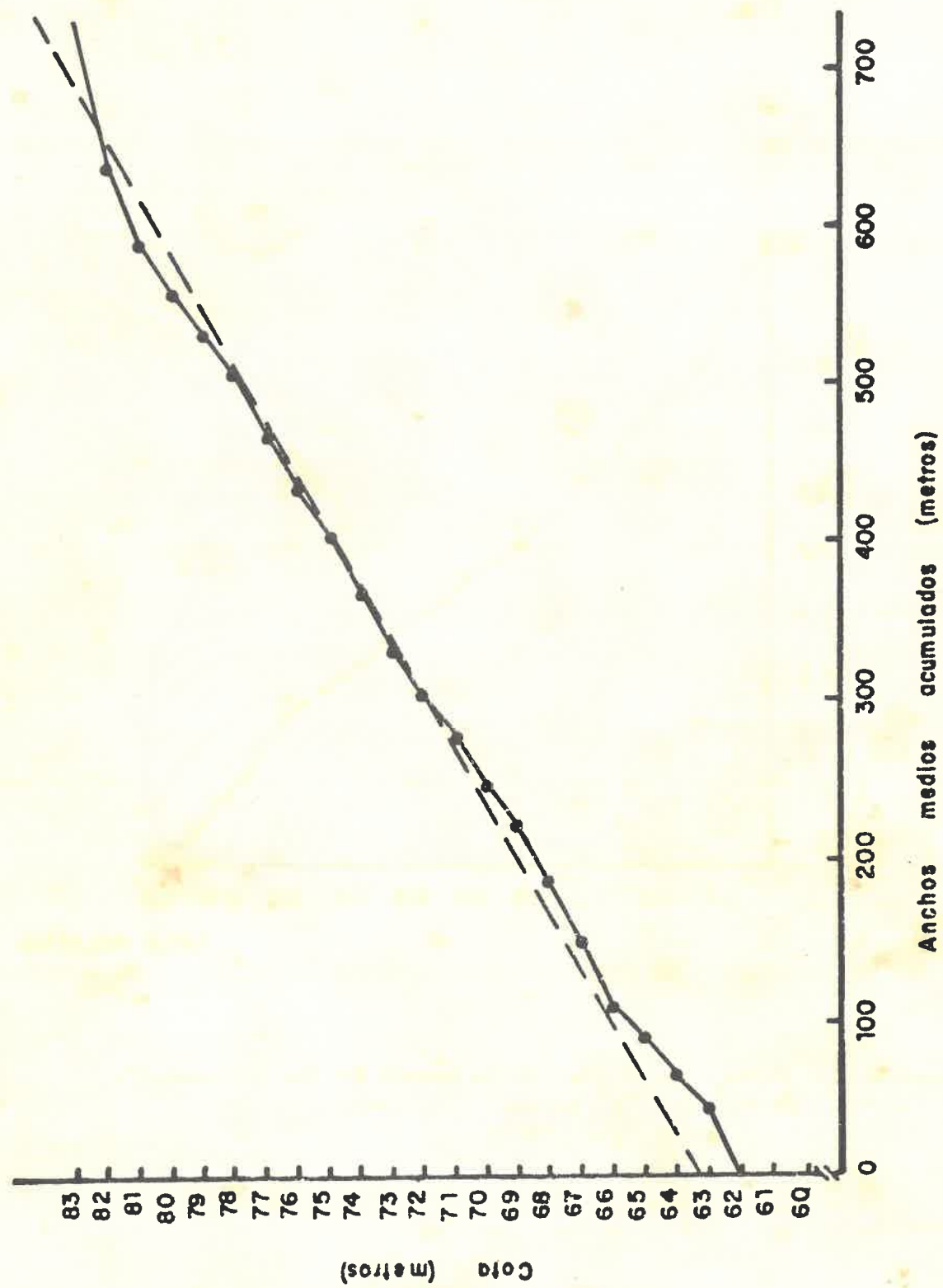


Figura N°10: Curva de pendiente media de la cuenca de "La Estanzuela".

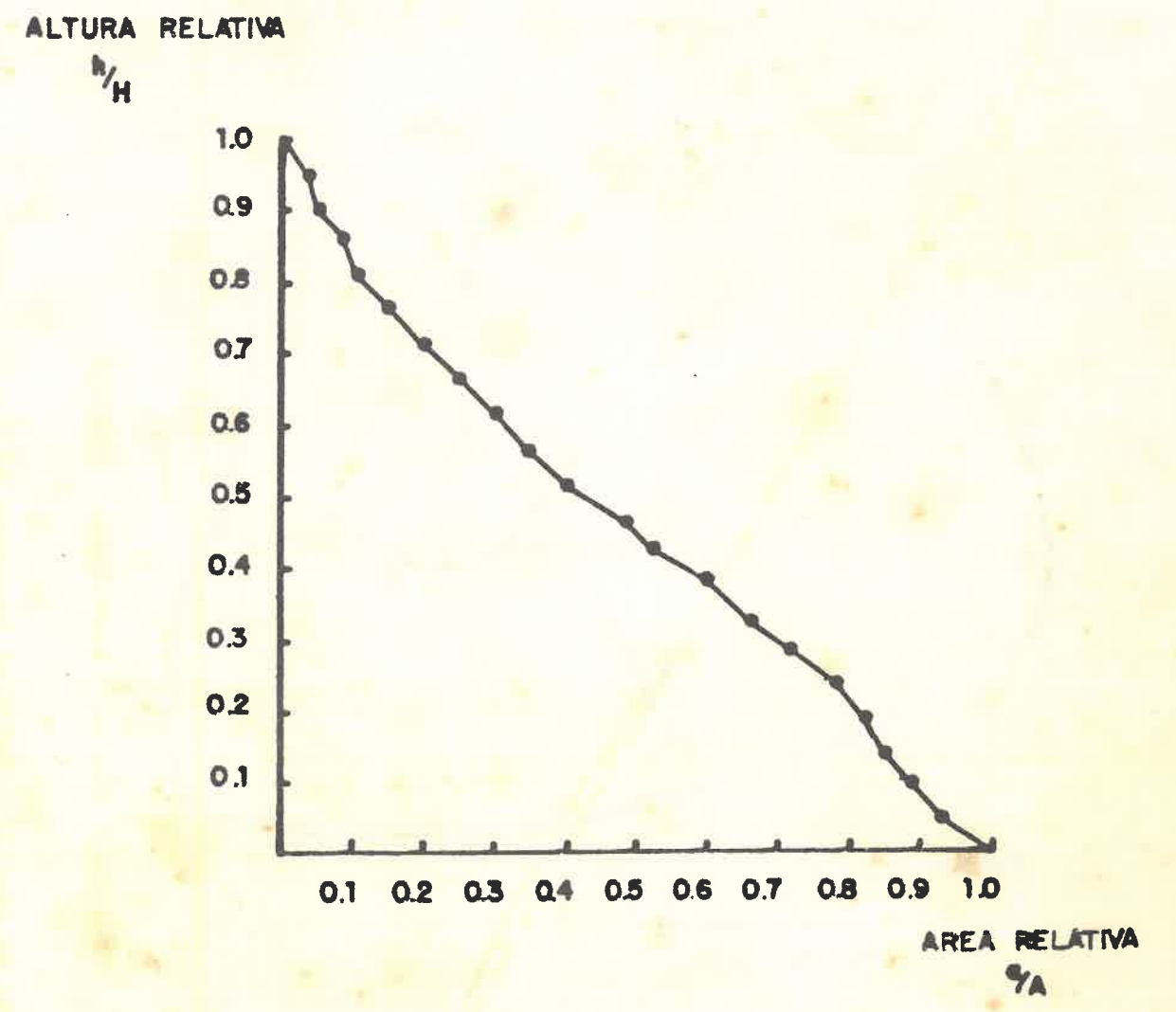


Figura N°11: Curva hipsométrica de la cuenca de "La Estanzuela".

