

// LA SIMULACION DE LLUVIAS

**Aplicación en estudios de conservación de suelos derivados de
materiales volcánicos de Costa Rica**

por

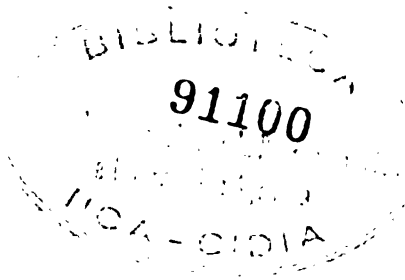
**Jean Collinet
Alex Tineo Bermúdez**

y colaboración de

**Jean Asseline
Donald Kass**

**Proyecto RENARM/Cuencas del CATIE Turrialba (Costa Rica)
Departamento DEC / UR24 del ORSTOM París (Francia)**

junio de 1995



Plan

1. INTRODUCCIÓN.. ¿POR QUÉ SIMULAR LLUVIAS?

2. EL MÉTODO

- 2.1. El simulador de lluvia**
- 2.2. Protocolos experimentales**
- 2.3. Información generada**

3. PRIMERAS SIMULACIONES DE LLUVIAS EN COSTA RICA

- 3.1. Melanudands de San Juan Sur**
- 3.2. Udividrands del volcán Irazú**
- 3.3. Interpretaciones**

4. CONCLUSIÓN, APLICACIONES Y LIMITACIONES

1. ¿POR QUÉ SIMULAR LLUVIAS?

Simular lluvias es una operación interesante para obtener numerosos parámetros físicos de los suelos, útiles para orientar correctamente su manejo y conservación.

Simular lluvias permite obtener más rápidamente estos parámetros que bajo lluvias naturales, ya que se debe esperar, a menudo, más de 6 meses en las zonas secas.

Los parámetros útiles pertenecen a tres categorías que son:

- las de los caracteres hídricos internos del depósito-suelo y, más que todo, de la parte del agua entre la porosidad total y la capacidad al campo que corresponde al drenaje por gravedad, *(acetato 2 sobre la composición volumétrica de suelos de Tuis)*
- las características hidrodinámicas tal como sus conductividades superficial saturada *(1 diapositiva enseñando varias conductividades hidráulicas en Africa del Oeste)* que dependerá no tanto de la textura del suelo, como de la organización de los elementos en varios tipos de estructuras y porosidades desde la superficie del suelo, o de la transición entre los diferentes horizontes del suelo, *(2 diapositivas enseñando láminas delgadas de suelo con encostramientos y láminas arcillosas enterradas)*
- los diversos componentes de la erodibilidad del suelo, que combinan sus efectos para producir la erosión general de los suelos naturales o de las tierras cultivadas, eso bajo los efectos de varios tratamientos o varias condiciones topográficas, *(1 diapositiva de la movilización inicial de la tierra, con encostramientos..)*

La simulación de lluvia permite considerar los numerosos parámetros que mezclan simultáneamente sus efectos durante una lluvia natural (intensidad, duración, altura de la lluvia) y así facilitar todas las interpretaciones ulteriores.

Permite respetar las características de los procesos naturales, entre ellos, una infiltración bajo una carga de agua de algunos milímetros, es decir, idéntica a la de las lluvias naturales.

Por fin, se puede elegir y simular: (i) numerosos eventos lluviosos y, (ii) dado que el sistema de simulación es móvil, seleccionar situaciones representativas del suelo, aspecto que se desarrollará más en el capítulo "protocolos experimentales".

2) EL MÉTODO

2.1. El simulador de lluvias

Concepción

El equipo es concebido:

- (i) para simular lluvias con intensidades, duraciones, láminas de lluvia variables pero siempre controladas sobre una parcela experimental,
- (ii) para recuperar y medir los flujos hídricos del escurrimiento así como las cargas sólidas

de estos flujos:

(acetato 3 del esquema del mini-simulador de lluvia)

Descripción y funcionamiento

El agua proviene de un tanque, o de otras fuentes de agua, la cual es bombeada bajo una presión controlada hasta el sistema aspersor suspendido en la parte alta de una torre metálica de 3,5m de alto.

Este sistema aspersor (motor de la cabeza de aspersión y maleta electrónica) permite obtener todos los rangos y todas las asociaciones de intensidades entre 18mm.h-1 y 130mm.h-1, por medio de la variación del ángulo de aspersión al nivel de la parcela *(acetato 4 del principio de variación de las intensidades)*

La parcela tiene una superficie de 1 metro cuadrado delimitada por un marco metálico.

Se mide el escurrimiento a la salida de la cuneta de la parcela, esta medida puede obtenerse por un registro limnigráfico continuo y automático o por tomas de muestras de aguas de volumen y duración conocidos, con un operador que tiene una probeta y un cronómetro.

Se miden las cargas sólidas de la erosión reagrupando algunas muestras del agua escurrida de la cual se conoce el caudal y el tiempo de la toma.

El material anexo incluye:

- una bomba de agua eléctrica, y una bomba térmica,
- una planta eléctrica (entre 2,5 y 4 KVA)
- una batería de 12 voltios para alimentar la maleta electrónica y la cabeza del simulador,
- varios manómetros,
- más abajo del sistema de aspersión hay un sistema de recuperación del agua en exceso para no gastarla en las regiones secas y regar unicamente lo necesario del agua fuera de la parcela,
- 5 marcos complementarios para instalar los otros sitios experimentales y ganar tiempo,
- un manto sobre la torre como protección contra vientos excesivos *(diversas diapositivas)*.

2.2. Protocolos experimentales

Se intenta respetar, lo más posible, las características climáticas de la región de los ensayos y, entre ellas, las características de los eventos lluviosos reales. Por eso se prepara cada misión por un estudio preliminar de las recurrencias de las lluvias, generalmente por épocas de retomo de 2, 5, 10 años para obtener las duraciones reales de los chaparrones de cada intensidad.

Por ejemplo, en la región de Turrialba se puede observar las relaciones intensidad/duración que siguen *(acetato 5 del cuadro 1)*

Cuadro I: Regiones de Turrialba y Pacayas, intensidades máximas para diferentes duraciones y intervalo de retorno (según Amezquita 1974 citado por A. Tineo Bermúdez)

Intervalo de retorno (años)	Duración (min.) e intensidades máximas (mm.h-1)					Localidades (y altitud)
	5	10	15	30	60 min	
5	158	122	101	77	50 mm.h-1	Pacayas 1850m
5	135	116	100	76	54 -	Turrialba 650m
10	185	143	120	85	57 -	Pacayas 1850m
10	139	126	107	85	60 -	Turrialba 650m
50	275	215	180	125	88 -	Pacayas 1850m
50	149	147	126	100	73 -	Turrialba 650m

En lo que se refiere a la elección de las situaciones experimentales, todo va a depender del problema que se debe tratar.

Se pueden probar:

- los comportamientos hídricos y erosivos de varios tipos de suelos asociados dentro de una toposecuencia, o algunos suelos representativos de una cuenca hidrológica.

- los efectos de varias técnicas culturales y de varias coberturas vegetales (hasta unos 2,5 metros de altura).

- por cada situación experimental, los efectos de varios estados de desecación del suelo (se utiliza generalmente el tiempo de "descanso" de la parcela entre dos lluvias simuladas consecutivas).

- los efectos de varias pendientes (el simulador puede trabajar correctamente hasta 40% de pendiente con la utilización de marcos especiales).

2.3. Informaciones generadas

La simulación de lluvia sobre una parcela experimental provee dos tipos de información: (i) la que trata de la hidrodinámica, (ii) la que concierne a la erosión.

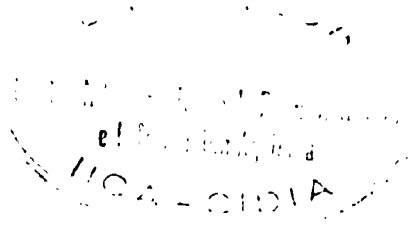
2.3.1. Hidrodinámica

(acetato 6 de un hidrograma teórico)

En lo que se refiere al aspecto "hidrodinámica", el diagrama llamado "hidrograma"-del acetato n°6 presenta el prototipo de lo que se puede registrar a la salida del canal de la parcela.

Este hidrograma de escurrimiento presenta 4 fases características que son:

(i) la fase 1 de "imbibición" o "preliminar", sin escurrimiento porque la intensidad general de infiltración F (mm.h-1) del suelo de la parcela es más elevada que la intensidad, constante, de la lluvia simulada I (mm.h-1). Al final de esta fase, se puede observar, en la superficie, algunos charcos



(S = stock superficial del agua (mm)) a causa de las disminuciones locales de la infiltrabilidad. No hay comunicación con el canal por lo que no se observa ningún escurrimiento. Durante esta fase se puede medir la altura de la lluvia de imbibición P_i (mm) que se infiltra totalmente.

(ii) fase 2 de "instauración de los escurrimientos" o fase de transición, algunos flujos de aguas empiezan a comunicarse con el canal, hay escurrimiento con un caudal creciendo porque empiezan algunas saturaciones hídricas superficiales al nivel de los charcos. La intensidad general de infiltración de la parcela se hace poco a poco más débil que la de la lluvia. Una parte del agua de los charcos vierte en el canal, y se llama lámina de detención superficial movilizable por el escurrimiento D_m (mm). Ya se puede entender que el stock S de la fase 1 sin escurrimiento y la detención D_m de las fases con escurrimientos crecen en relación directa con la rugosidad de la parcela.

(iii) fase 3 del "régimen constante del escurrimiento", durante esta fase toda la superficie de la parcela participa al escurrimiento porque ella queda cubierta por una lámina continua de agua ($dD_m/dt = 0$), así se produce una ponderación entre las diferentes infiltrabilidades locales de la parcela para obtener, al nivel del canal, una intensidad de escurrimiento máxima y constante R_x (mm.h-1) a la cual corresponde una intensidad de infiltración mínima y constante F_n (mm.h-1), estos caudales se mantendrán constantes: (i) si la intensidad de lluvia simulada I mm.h-1 se mantiene constante, (ii) si la estructura superficial del suelo no se modifica de manera que mantiene una conductividad hidráulica saturada constante durante la lluvia simulada.

(iv) fase 4 del "vaciado" inmediatamente al final del aguacero simulado se produce, sobre la parcela, una partición de la lámina D_m entre el agua que continúa escurriendo, llamada "detención superficial recuperable" D_r (mm), la lámina de infiltración que continúa infiltrándose L_i (mm) y una disminución del nivel de la lámina contenida en los charcos superficiales ($S_{tu} - S_{tf}$, (mm)) entre el tiempo al final de la lluvia t_u y el final del escurrimiento t_f . Así, la única altura de lámina de agua que se puede medir es la detención superficial recuperable D_r . Los parámetros D_m y D_r son interesante de medir o calcular para relacionarlos con las características superficiales de las parcelas y, entre ellas, la rugosidad.

2.3.2. Erosión

(acetato 7 de un turbidograma teórico así que del solidograma correspondiente)

En lo que se refiere a los procesos de la erosión, se puede adoptar el mismo tipo de análisis siguiendo las diferentes fases de movilización de la tierra simultáneamente a las fases del escurrimiento identificadas anteriormente. Tomando muestras durante las 3 fases del escurrimiento se puede seguir la evolución de las cargas sólidas C (g.L-1) por tipos de eventos y de situación. El registro durante los escurrimientos de esta evolución de la carga sólida se llama "turbidograma".

La multiplicación de esta carga sólida por el caudal del escurrimiento leído sobre el hidrograma permite calcular y dibujar un "solidograma" que es el registro de los caudales sólidos por unidad de superficie Q_{sol} (g.sec-1.ha-1) cuya integración permite obtener la "movilización inicial de tierra" MIT (kg o toneladas.ha-1), componente preliminar de la erosión general.

Los turbidogramas pueden presentar varios aspectos *(7 diapositiva de la evolución de los*

turbidigramas y su tipología) con relación a las características de resistencia del suelo (estabilidad de los agregados naturales o terrones de labranza) así como de las de su protección (mulch, cobertura vegetal, pedregosidad, espesor de la lámina Dm).

Existen así reales posibilidades de construir una tipología de las evoluciones de las cargas sólidas por tipos de suelos, tratamientos culturales, tipos de coberturas, pendientes.

2.3.3. Resumen de las informaciones esenciales

En resumen, las informaciones esenciales obtenidas al final de cada uno de los protocolos son:

Informaciones directas

I (mm.h-1) = intensidad de la lluvia simulada

t_u (min) = tiempo de la lluvia útil

t_i (min) = tiempo al inicio del escurrimiento

t_f (min) = tiempo al final del escurrimiento

P_u (mm) = $I \times t_u$ = altura de la lluvia útil

P_i (mm) = $I \times t_i$ = altura de la lluvia de imbibición

L_r (mm) = lámina escurrida

D_r (mm) = detención superficial recuperable (parte del escurrimiento medida después del fin de la lluvia)

W_o o L_i (mm) = $P_u - (L_r + D_r)$ = lámina infiltrada

R_x (mm.h-1) = intensidad máxima del escurrimiento

F_n (mm.h-1) = $I - R_x$ = intensidad mínima de infiltración

C_s (g.l-1) = pico de la carga sólida, o turbidez

C_x (g.l-1) = carga sólida durante el regimen constante R_x del escurrimiento

Informaciones procesadas

K_{ru} (%) = $(L_r + D_r) / 100 P_u$ = coeficiente de escurrimiento

l_l (mm.h-1) = intensidad límite de la lluvia que provoca los primeros escurrimientos = abscisa al inicio de la recta

$R = f(l)$ o intersección de la recta $F_n = f(l)$ con la bisectriz $F_n = l$

MIT (g.m²-1 o Mg.ha-1) = movilización inicial de la tierra = componente "splash" de la erosión general ERO (sin o casi sin la parte "ABRA" ligada con la abrasión del flujo de escurrimiento)

$MIET$ (kg.ha-1.mm-1) = movilización inicial específica de la tierra = MIT / P_u .

3. PRIMERAS SIMULACIONES DE LLUVIAS EN COSTA RICA

La problemática general de los ensayos presenta una caracterización de los comportamientos hídricos y erosivos de las coberturas edafológicas de las vertientes del importante macizo de los volcanes Irazú y Turrialba.

Se tienen informaciones en lo que se refiere a los Melanudands arcillosos de río abajo cerca de los valles y de los Udivitrands arenosos río arriba, cerca de la cumbre. Faltan otras informaciones sobre algunas coberturas intermedias de los cuales comportamientos serán ulteriormente probados.

Presentaremos, con algunos hidrogramas y turbidigramas ciertos comportamientos típicos de los medios experimentales.

Enseñaremos la manera de extraer de estos gráficos las informaciones esenciales lo que permitirá algunos comentarios sobre las situaciones específicas de los dos ensayos.

3.1. Comportamiento de los Melanudands de San Juan Sur

(acetatos 8, 9, 10, 11, 12, 13)

Cuadro II: 5 situaciones experimentales de los Melanudands de San Juan Sur, pendientes #31%, Im lluvias # 60mm.h-1

JUAN01, desnudo,	ta max.,	Im = 60,8mm.h-1
JUAN02, desnudo,	ta 20min.,	Im = 60,8mm.h-1
JUAN07, sistema agroforestal,	ta max.,	Im = 60,8 mm.h-1
JUAN25, 100% pastos,	ta max.,	Im = 61,3mm.h-1
JUAN29, 80% maíz,	ta max.,	Im = 60,0mm.h-1

	SPu	Pi	Rx	SLr	SLi	Kr	MIT
	mm	mm	mm.h-1	mm	mm	%	Mg.ha-1
JUAN01	60,8	19,5	40	22,8	37,9	37,6	3,86
JUAN02	20,3	1,0	47	14,2	6,1	70,1	2,44
JUAN07	62,3	5,4	6	5,0	57,3	8,0	0,00
JUAN25	41,0	8,2	24	11,0	30,0	27,0	0,04
JUAN29	41,0	6,2	22	11,5	29,5	28,1	0,06

3.2. Comportamientos de los Udivitrands del volcán Irazú (finca Retes)

(acetatos 14, 15, 16, 17, 18)

Cuadro III: 4 situaciones experimentales de los Udivitrands del Irazú, pendientes #34%, Im # 60mm.h-1 y variables

RETES16, 100% pastos, ta max., Im = 59,9mm.h-1
 RETES04, desnudo, ta max., Im = 60,3mm.h-1
 RETES22, 100% pastos, ta 30min., Im = 30, 60, 90, 120mm.h-1
 RETES12, desnudo, ta 30min., Im = 30, 60, 90, 120mm.h-1

	SPu mm	Pi mm	Rx mm.h-1	SLr mm	SLi mm	Kr %	MIT Mg.ha-1
RETES16	42,9	8,0	47	24,6	18,3	57,4	0,00
RETES04	60,3	23,0	14	4,3	56,0	7,1	3,10
RETES22	60,3	3,5	21 48 83 110	51,6	8,7	85,6	0,01
RETES12	75,6	5,3	8 38 70 103	50,0	25,5	66,0	129,80

3.3. Interpretaciones

3.3.1. Efecto del tiempo de descanso en los Melanudands de San Juan Sur

La comparación entre las lluvias JUAN01 y JUAN02 caídas sobre los Melanudands muy arcillosos de San Juan Sur (50 hasta 70% de arcilla) permite poner de manifiesto el efecto del tiempo de desecación del suelo entre dos lluvias consecutivas:

- hay un aumento nítido del escurrimiento por disminución de la infiltrabilidad general de la parcela desnuda. Esta disminución viene de la saturación del depósito-suelo en sus primeros horizontes y tal vez de la disminución de la conductividad saturada de los primeros milímetros del suelo a causa de la formación de una costra (poco visible con una observación macroscópica, interés de hacer una lámina delgada de suelo).

- este aumento del escurrimiento entre la primera y la segunda lluvia es ligada con las modificaciones de los regímenes asociados siguientes: (i) en la fase I, disminución drástica de la altura de Pi que pasó de 19,5mm a 1,0mm, (ii) instauración más rápida del escurrimiento constante Rx durante la fase II, (iii) aumento nítido de este caudal constante Rx que pasó de 40mm.h-1 a 47mm.h-1 en la fase III.

- de esta manera el coeficiente de escurrimiento Kr pasó de 37,6 a 70,1 %.

- las cargas sólidas son fuertes y bastante semejantes en las dos lluvias (C # 3,0g.L-1), el turbidograma casi sin pico, presenta una movilización continua de los agregados superficiales sin acción protectora de la lámina de la detención superficial movilizable Dm porque ella se mantiene poco espesa.

- la conjunción de fuertes cargas y caudales dan una movilización inicial específica de la

tierra MIET fuerte que pasó de 63 a 118 kg de tierra movilizada por milímetro de lluvia caída por hectárea ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$).

3.3.2. Efecto de las coberturas vegetales en los Melanudands de San Juan Sur

La comparación de los efectos de tres coberturas vegetales diferentes es posible después de la primera lluvia ($t_a = \text{max.}$) con el análisis de los hidrogramas y turbidigramas de JUAN07 con cobertura agroforestal (callejón de Erythrina y maíz), JUAN25 (100% de pasto), JUAN29 (maíz con 80% de cobertura):

- se observa una fuerte disminución del escurrimiento ($K_r = 8\%$) en las parcela agroforestal a causa de una fuerte intercepción de la lluvia por las estructuras vegetales (hojas horizontales) de la Erythrina, los escurrimientos empiezan bastante temprano después de 5 minutos ($P_i = 5,4\text{mm}$) pero sus caudales de regímenes constantes se mantienen muy limitados con ($R_x = 6,0\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$). La movilización inicial de la tierra es indetectable ($\text{MIT} = 0,00$). Este sistema favorece altamente la infiltración.

- los comportamientos hídricos y erosivos de las situaciones que resultan de las lluvias JUAN25 (100% pastos) y JUAN29 (80% maíz) son bastante similares con K_r de 27 y 28,0% resultando de alturas P_i y regímenes R_x muy vecinos ($P_i = 8,2$ y $6,2\text{mm}$ y $R_x = 24$ y $22 \text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$). Ambas situaciones dan erosiones débiles (MIT de 40 y 60 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) más limitada por una movilización insignificante de sus cargas sólidas que por los escurrimientos que adquieren importancia.

3.3.3. Efecto del manejo de los Udivitrands de las tierras altas del volcán Irazú

A partir de los 2200m, una parte de las selvas que ocupaban la cumbre del volcán Irazú fueron parcialmente, y desde bastante tiempo, reemplazadas por pastizales y algunos cultivos (hortalizas, fincas de semillas etc.). Los Udivitrands arenosos ($< 7\%$ arcilla), masivos pero poco cohesivos, se han desarrollado sobre las capas más jóvenes de las cenizas del Irazú. Se nota una fuerte heterogeneidad vertical de los materiales parentales (granulometría, antiguos horizontes superficiales enterrados o cocinados por algunas fases eruptivas).

Sobre ellos, la simulación de lluvia ha revelado dos comportamientos fundamentalmente diferentes entre los ocupados por pastos y los desnudos, preparados por algunos cultivos:

(i) RETES16 (pasto) y RETES04 (desnudo), después de una primera lluvia de $\# 60,0\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ de intensidad sobre un suelo fresco ($t_a = \text{max}$ $\# 66\%$ de la capacidad del campo) muestran las reacciones siguientes:

- Contrariamente a lo generalmente admitido los pastos generan escurrimientos muy importantes con un coeficiente K_r de 57,4 % proviniendo de la conjunción de P_i débiles (solamente 4 minutos de tiempo preliminar), de una instauración bastante rápida de un caudal constante R_x bien elevado ($R_x = 47,0\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$). La protección total del suelo por las hierbas y un tejido radicular denso no permiten ninguna movilización de tierra.

- Sobre las arenas de los Udivitrands desnudos (RETES04), la infiltración se mantiene importante durante toda la primera lluvia, lo que resulta de la conjunción de altas láminas P_i (23mm) y bajos caudales R_x (14mm.h-1). Sin protección de la cobertura vegetal y de sus raíces la MIT adquiere relevancia (3,10t.ha-1) lo que provoca una MIET de 51,4kg.ha.mm-1. Esta movilización es ligada con cargas sólidas CS muy importante ($\#15\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), únicamente limitada por

los débiles escurrimientos.

(ii) RETES22 (pastos) y RETES12 (desnudos) después de una lluvia con intensidades variables entre 30 y 120mm.h⁻¹ sobre suelos húmedos (ta = 30min) muestran las reacciones siguientes:

- Efectos nítidos del aumento de la energía de las lluvias sobre la movilización de las tierras desnudas con aumentos proporcionales de las cargas CS con los de la intensidad, (20 hasta 45g.l⁻¹ y un pico de 55 g.l⁻¹).

- La protección ofrecida por los pastos se mantiene eficaz incluso para las más fuertes intensidades de la lluvias.

- Los escurrimientos sobre pastos se mantienen muy fuertes.

- Los escurrimientos anteriormente débiles sobre los suelos desnudos aumentan de manera importante después de la saturación hídrica de los horizontes superficiales.

3.3.4. Hipótesis de trabajo

Si la comparación de todos los comportamientos de las coberturas edafológicas del macizo de los volcanes Turrialba y Irazú es prematura porque se debe completar las experimentaciones, ya se puede notar, por lo menos, tres puntos útiles para orientar los estudios que seguirán.

A) Los fuertes escurrimientos de los Udividrands con pastizales de los altos del macizo provendrían de una hidrofobia de los horizontes vegetales (hierbas y sus raíces), hidrofobia que resulta probablemente de procesos de tensioactividad, la interfase agua/vegetal, por compuestos presentes sobre estos vegetales de altitud (ceras y otros compuestos orgánicos). Así se mantiene una acumulación de aire en los tejidos radiculares que juega el papel de un tapón contra la infiltración. La comparación de los gráficos RESTE16 y RETES04, con el mismo tiempo de desecación y la misma intensidad de lluvia, constituye una buena verificación de esta hipótesis, porque se observa un aumento inmediato de la intensidad de infiltración cuando se quitó los pastos y sus raíces. Al nivel de la vertiente del volcán este comportamiento de los pastos de altitud explica que los escurrimientos pueden aparecer muy cerca de las cumbres del volcán. Sería una de las razones, con la conjunción de fuertes tormentas, de las inundaciones catastróficas en los valles de Turrialba, en el mes de agosto de 1991.

B) En el lado opuesto, los Melanudands arcillosos protegidos por pastos de los valles, no manifiestan este proceso de hidrofobia de modo que sus infiltraciones se mantienen siempre más importantes que las de los mismos suelos desnudos.

C) La movilización inicial de las tierras desnudas, primer componente de la erosión general, es fuerte en los dos tipos de suelos:

- (i) en los Udividrands arenosos, son las arenas poco cohesivas las que se eliminan, capa por capa con una sensibilidad directamente ligada con la energía de la lluvia que cae directamente sobre el material erodible sin ninguna intercepción por la lámina Dm demasiado delgada para asegurar una protección eficaz.

- (ii) en los Melanudands arcillosos, se encuentran finalmente los mismos resultados por falta de cohesión entre los agregados aún si ellos, aislados, son muy estables. De esta manera, el suelo desnudo se erosiona igualmente muy fuertemente por capas sucesivas de agregados que

"flotan" sin destruirse. Se debe insistir, entonces, sobre una ausencia total de correlación entre la estabilidad estructural y la erodibilidad de estos Melanodands arcillosos.

4. CONCLUSION: APLICACIONES Y LIMITACIONES

4.1. Aplicaciones actuales

Todas las informaciones anteriores constituyen las "tarjetas de identificación" de cada uno de los tipos de medios (suelos, coberturas, cultivos, pendientes) que se asocian para construir una cuenca. Cada "tarjeta" contiene una carga informativa bastante precisa para permitir reevaluar, optimizar los parámetros de entrada de las cajas, negras o grises, de los modelos matemáticos o semi-empíricos de previsión de los escurrimientos o de las erosiones a la salida de una cuenca.

De manera más teórica se puede también esperar reevaluar los parámetros de las fórmulas antiguamente "universales" de previsión de la pérdida en tierras y así clasificar los comportamientos erosivos (Ksim.) de los suelos, los efectos de varias coberturas vegetales (Csim.), los de varias técnicas de conservación (Psim.). En lo que se refiere a este último punto, se puede enfocar la optimización del tamaño y de la geometría de varias obras de conservación por las medidas de volúmenes de flujos hídricos previsible que infiltrar o caudales de los mismos que eliminar del campo entre dos obras consecutivas de conservación.

4.2. Otras aplicaciones

Utilizando varias pruebas artificiales, se pueden aislar los efectos de algunas organizaciones particulares de la superficie de suelo sobre la hidrodinámica y la movilización de la tierra, apoyando así los temas de investigación más fundamental.

En lo que sigue, se presentan algunas posibilidades de analizar los efectos aislados o combinados en parcelas artificiales de:

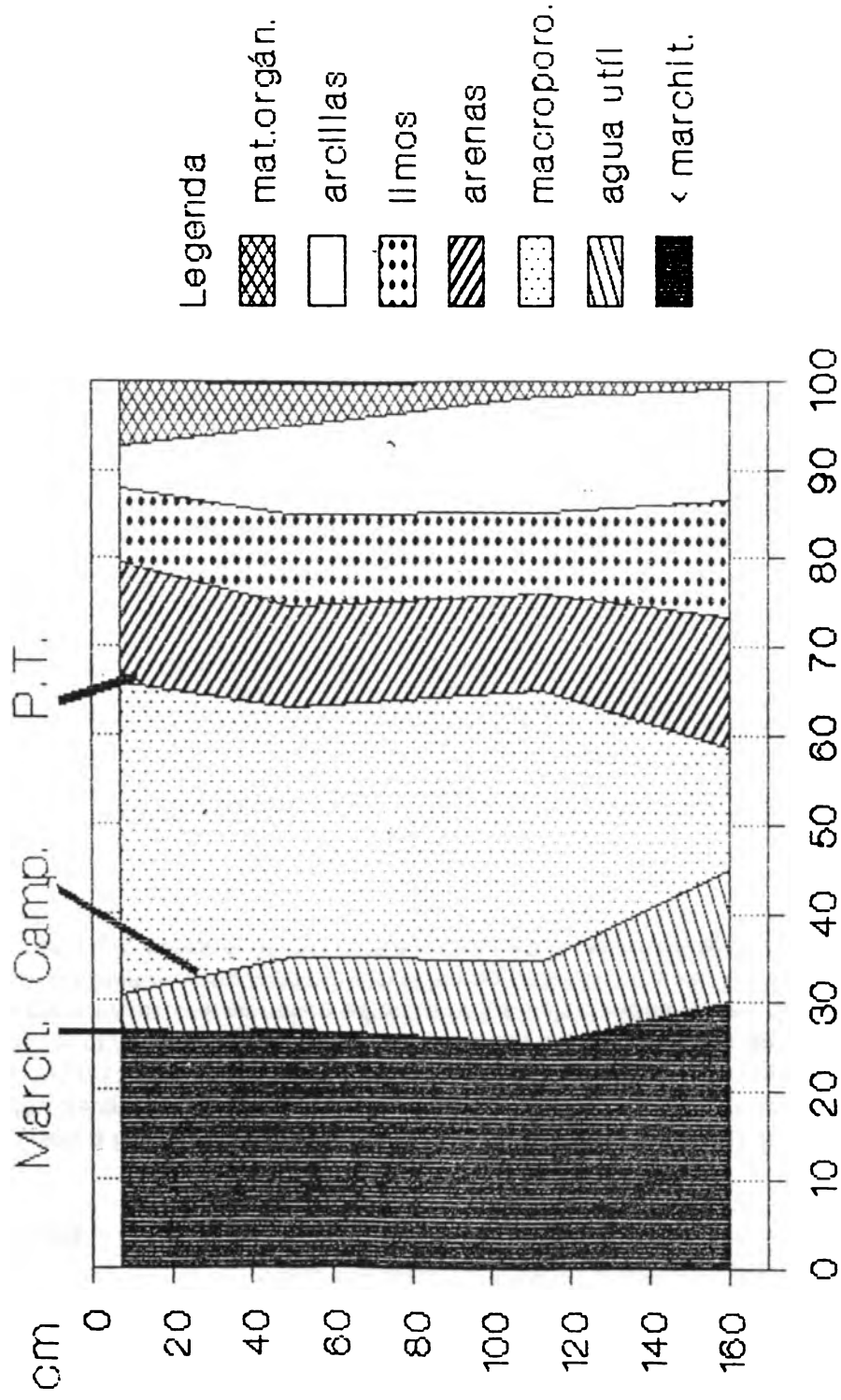
- unas cargas crecientes de elementos gruesos en la superficie del suelo,
- varios tipos de estructuras de intercepción de la energía de la lluvia,
- una simulación asociada con materiales lisimétricos y tensiométricos para seguir la lixiviación y la acumulación de compuestos solubles (p.e. concentración y composición variables de abonos derramados en la superficie),
- simulación asociada con medidas humidimétricas para seguir la hidrodinámica interna (velocidad de transición entre horizontes y volúmenes hídricos de cada uno de ellos, influencia de la compactación).
- el efecto de las actividades de la fauna del suelo (insectos, lombrices, etc.) sobre la estructura, más precisamente sobre la distribución entre macro - y microporosidad y, en consecuencia, sobre las modificaciones derivadas de la infiltrabilidad general o la conductividad hidráulica saturada superficial.

- la estabilidad estructural de agregados que provienen de varios tipos de suelos o terrones de labranza de varios diámetros, prueba de refuerzo de la estabilidad con varios compuestos naturales o sintéticos.

4.3. Límites de utilización

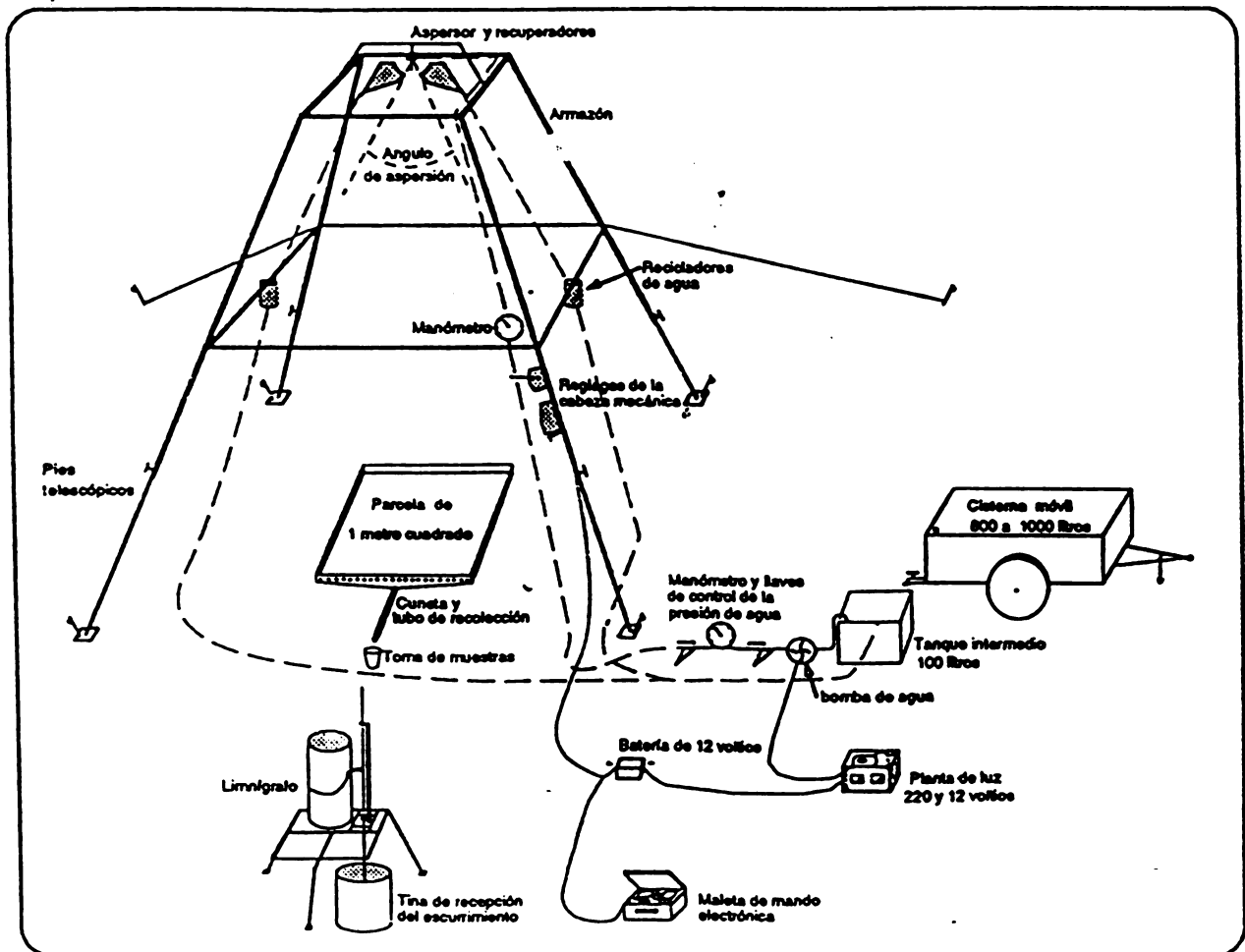
Los límites son inherentes a la superficie de la parcela. Si el principio del dispositivo se mantiene pertinente para todas determinaciones hídricas y hidrodinámicas, no se puede esperar obtener una evaluación compleja de la erosión general porque el tamaño de la parcela no permite obtener la abrasión ligada con el movimiento de los flujos hídricos. Sin embargo, se puede decir que pocas son las parcelas más largas que permiten establecer las velocidades límites de los flujos hídricos así como de sus parámetros derivados que son la competencias del transporte por varias distribuciones granulométricas y el poder abrasivo con arreglo a las cargas transportadas.

2 Composición volumétrica de un suelo de origen volcánico - cuenca del río Tuis, Costa Rica.



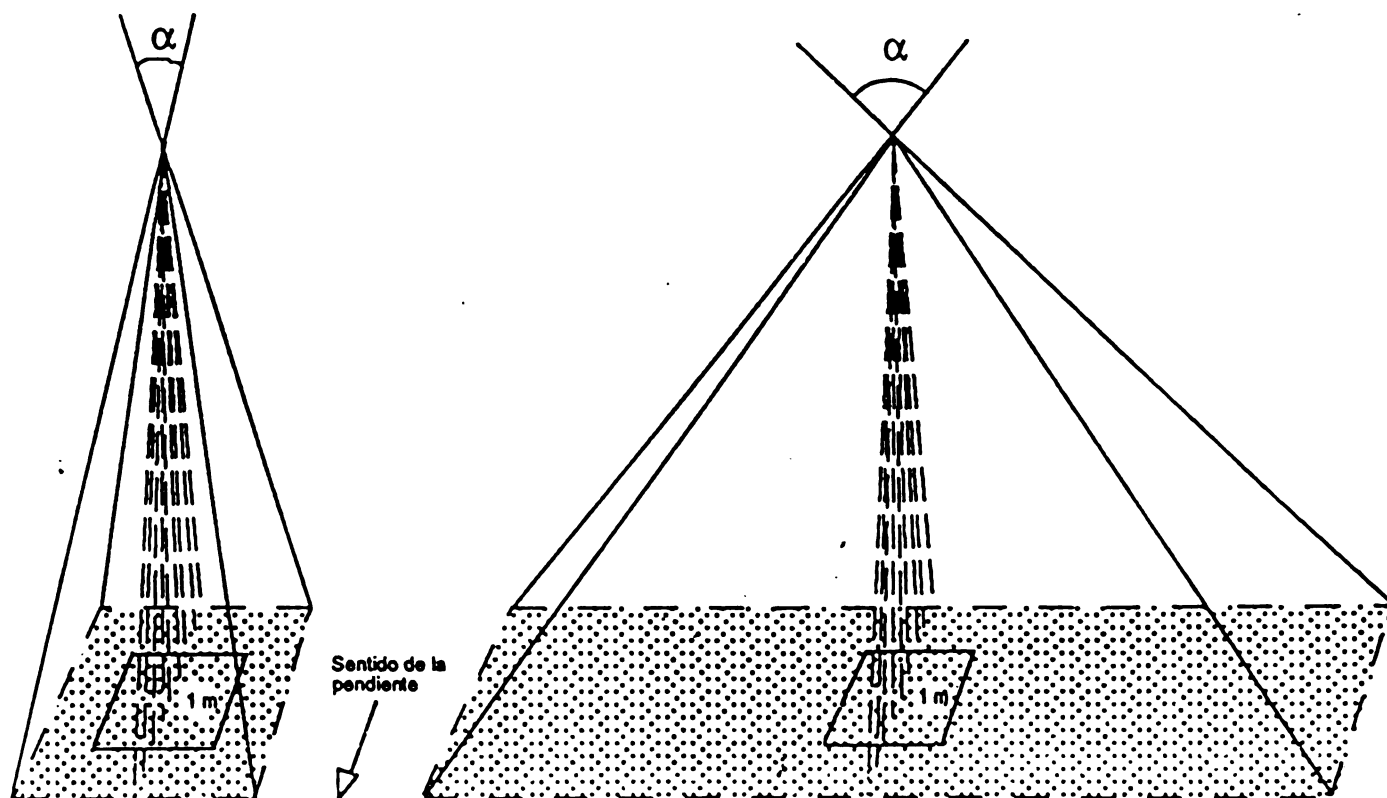
volumenes de fluidos y sólidos %
Cuenca del río Tuis, Costa Rica

3 Esquema del mini-simulador de lluvia tipo Asseline - Valentin /ORSTOM



(in "La simulación de lluvia...", Asseline y al. 1993)

4 Principio de la variación de las intensidades de las lluvias simuladas



- ángulo de oscilación pequeño
- superficie regada reducida
- fuerte intensidad de lluvia

- ángulo de oscilación grande
- superficie regada mayor
- baja intensidad de lluvia

Al variar el ángulo de aspersión α , se modifica la superficie regada con la misma cantidad de agua, cambiando así la intensidad de la lluvia.

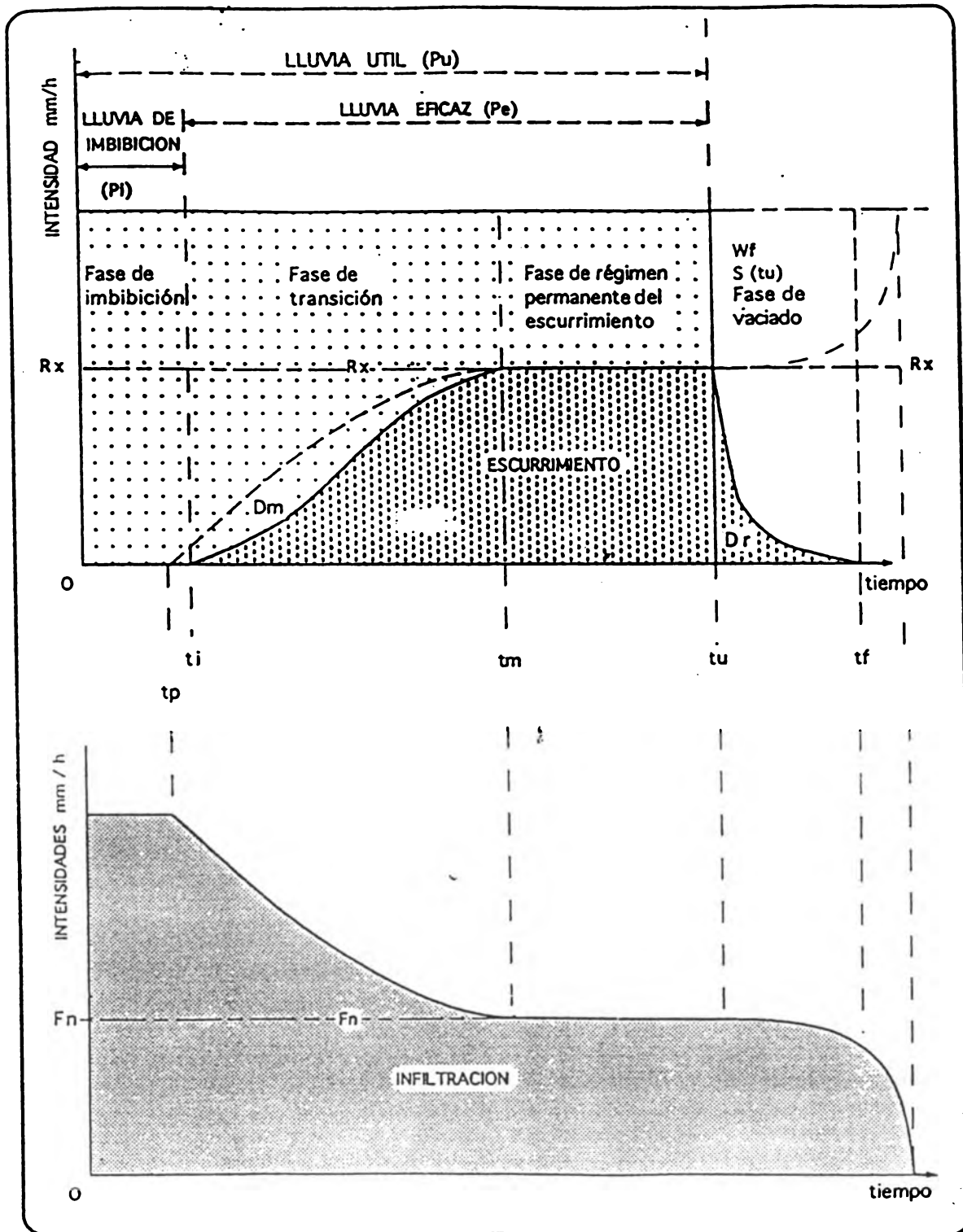
(in "La simulación de lluvia.., Asseline y al. 1993)

5 Preparación del protocolo experimental: curvas intensidad/duración por varias épocas de retorno

Cuadro I: Regiones de Turrialba y Pacayas, intensidades máximas para diferentes duraciones, intervalo de retorno (según Amezquita 1974 citado por A. Tineo Bermúdez)

Interval de retorno (años)	Intensidades máxima (mm.h-1) y duración en min.					Localidad
	5	10	15	30	60 min	
5	158	122	101	77	50 mm.h-1	Pacayas 1850m
5	135	116	100	76	54 -	Turrialba 650m
10	185	143	120	85	57 -	Pacayas 1850m
10	139	126	107	85	60 -	Turrialba 650m
50	275	215	180	125	88 -	Pacayas 1850m
50	149	147	126	100	73 -	Turrialba 650m

6 Hidrograma teórico de escurrimiento, y de infiltración, obtenido bajo simulación de lluvia



Escurrimiento e infiltración bajo intensidad de lluvia constante (A. Lafforgue)

7 Turbidograma teórico obtenido bajo simulación de lluvia

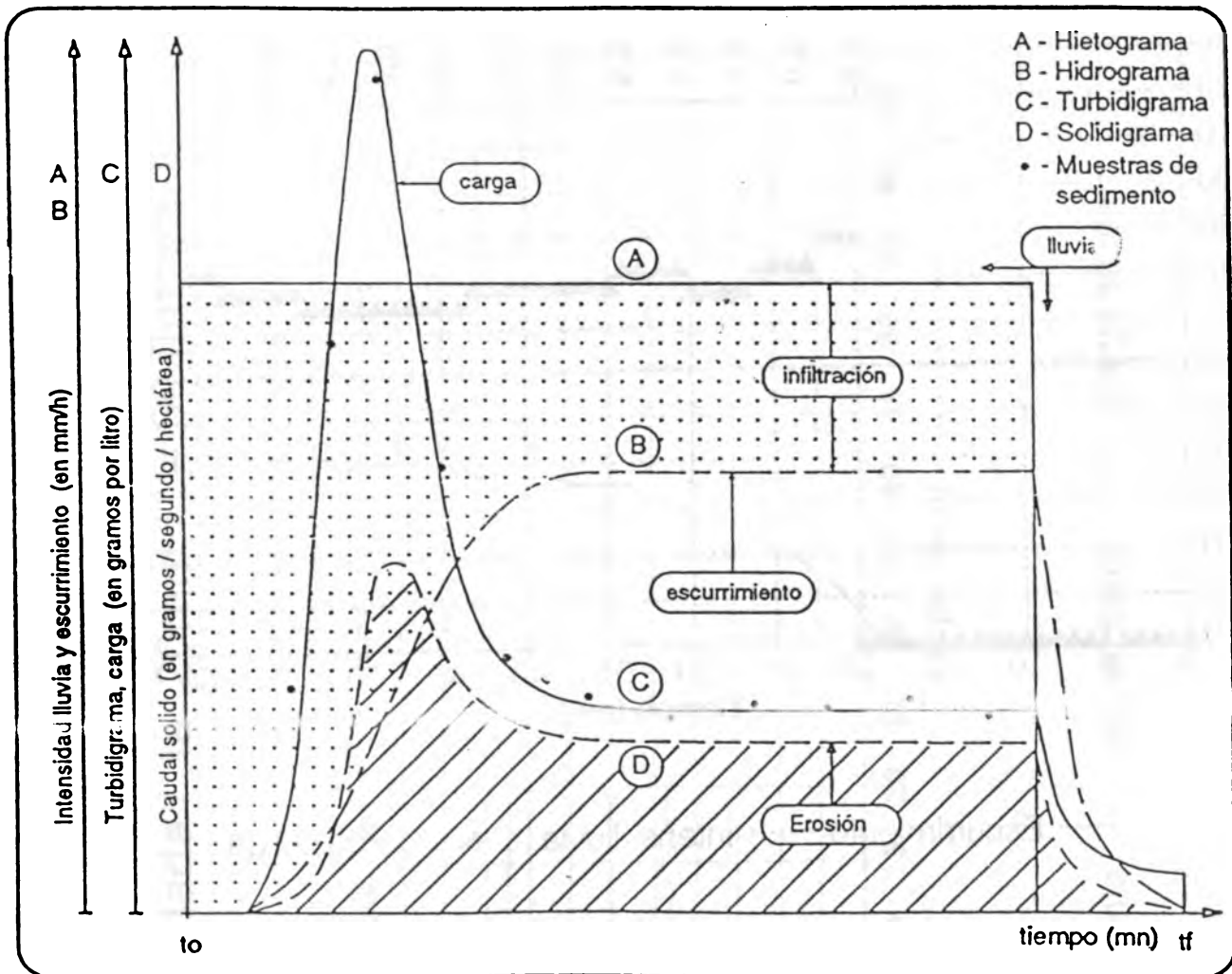
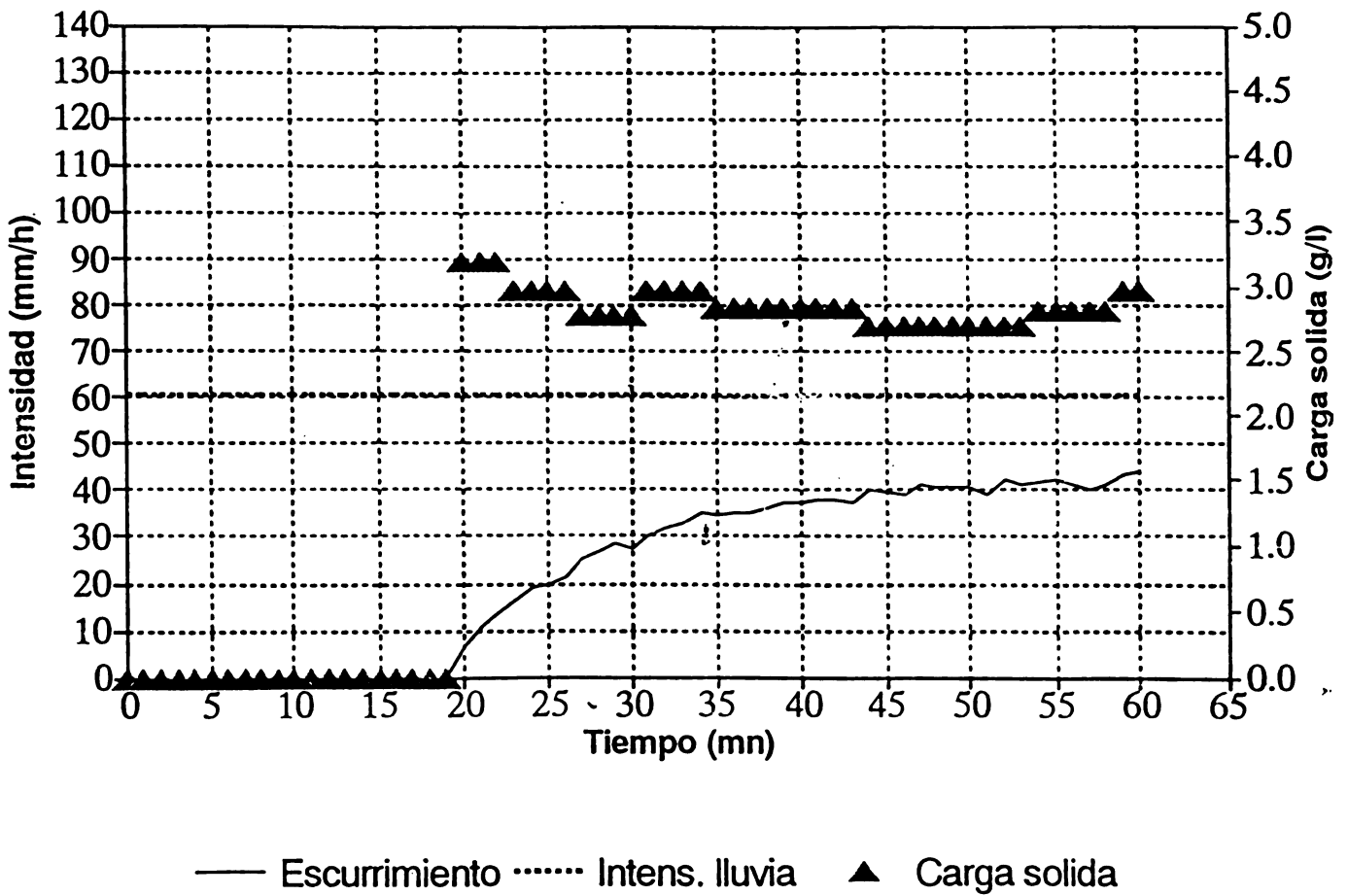
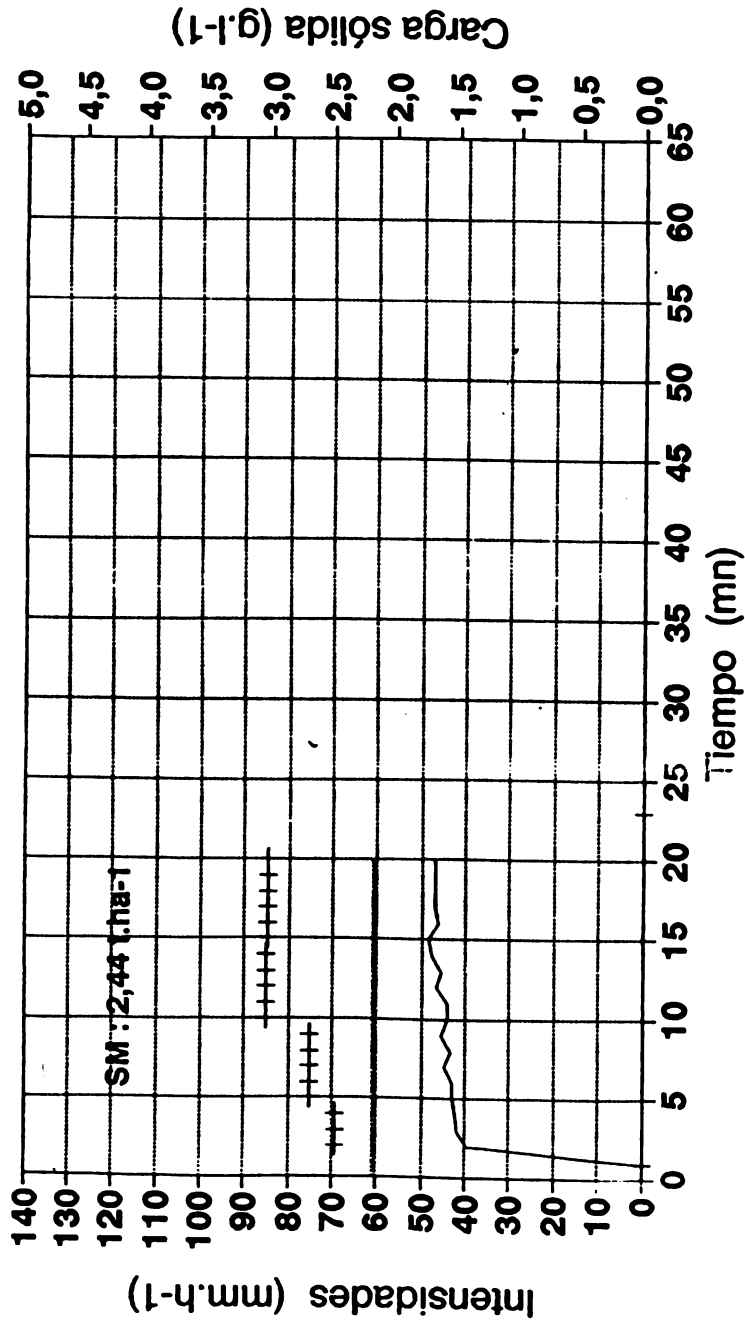


Diagrama teórico de una lluvia simulada (según A. Lafforgue y J. Collinet)

8 Simulación de lluvia - JUAN01 desnudada / ta max. / I = 60,8mm.h-1

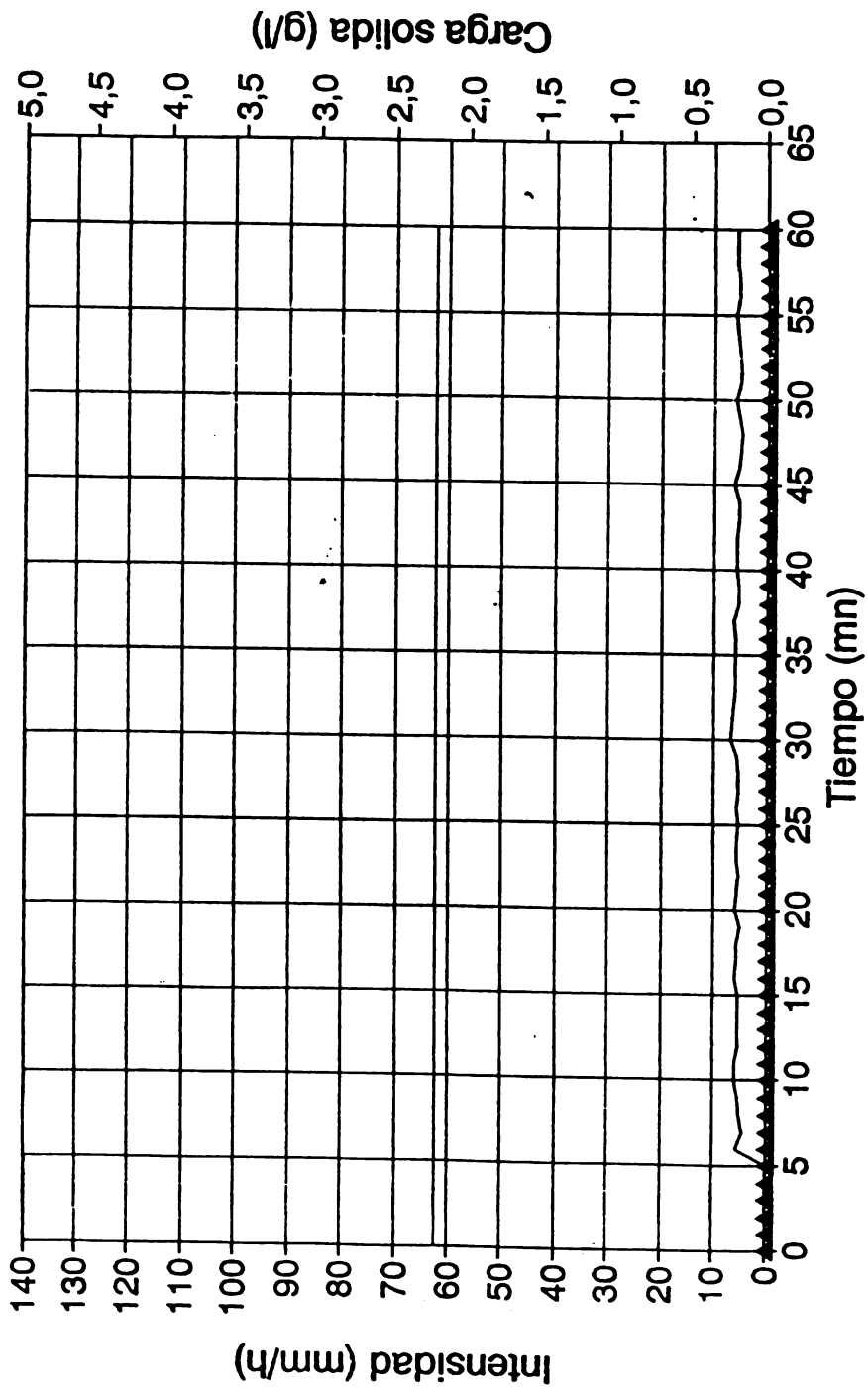


9 Simulación de lluvia - JUAN02 desnudada / ta 20min./l = 60,8mm.h-1



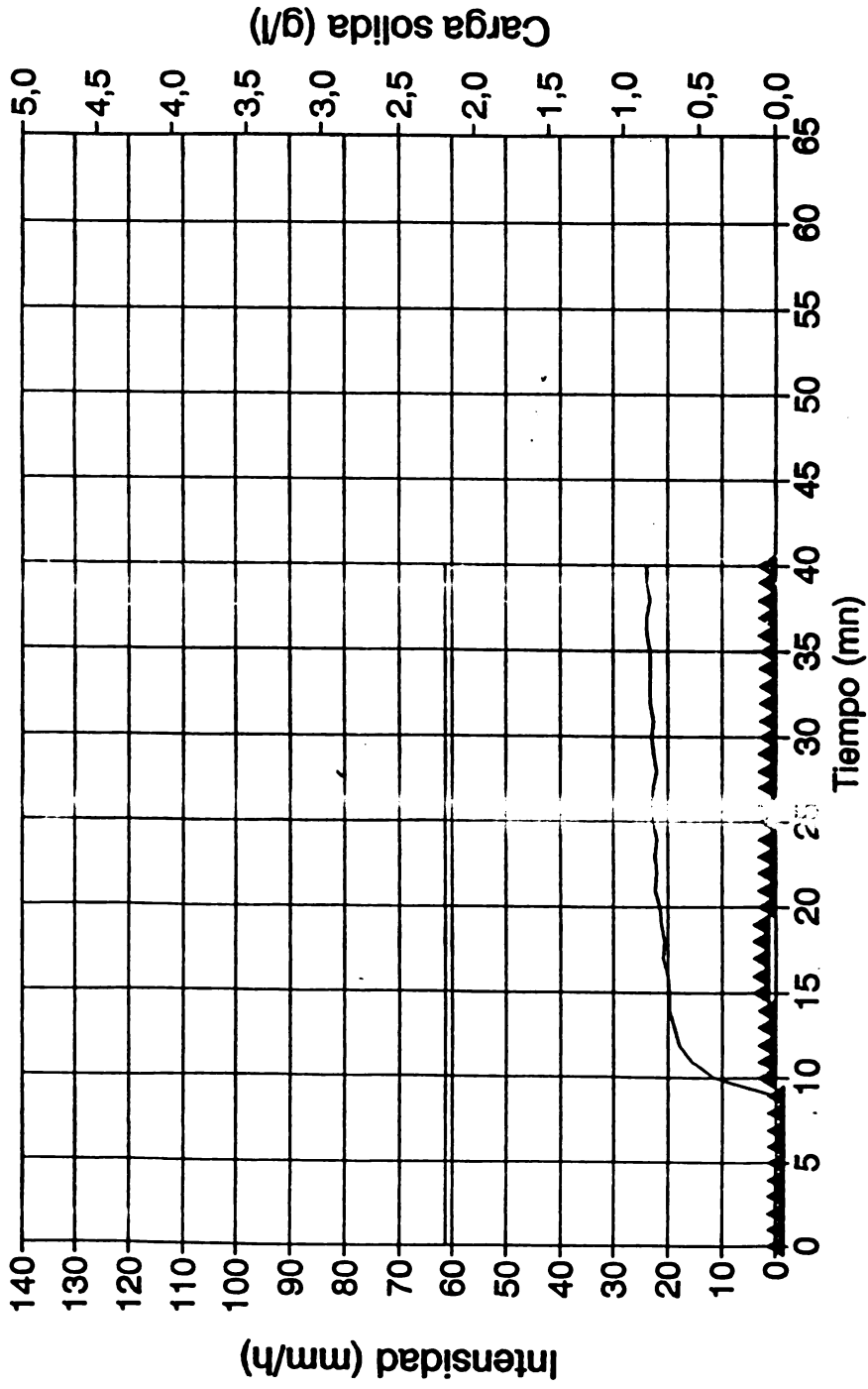
— Ecurrimiento — Intens. lluvia + Carga sólida

10 Simulación de lluvia - JUAN07 agroforestal / ta max. / I = 60,8mm.h-1



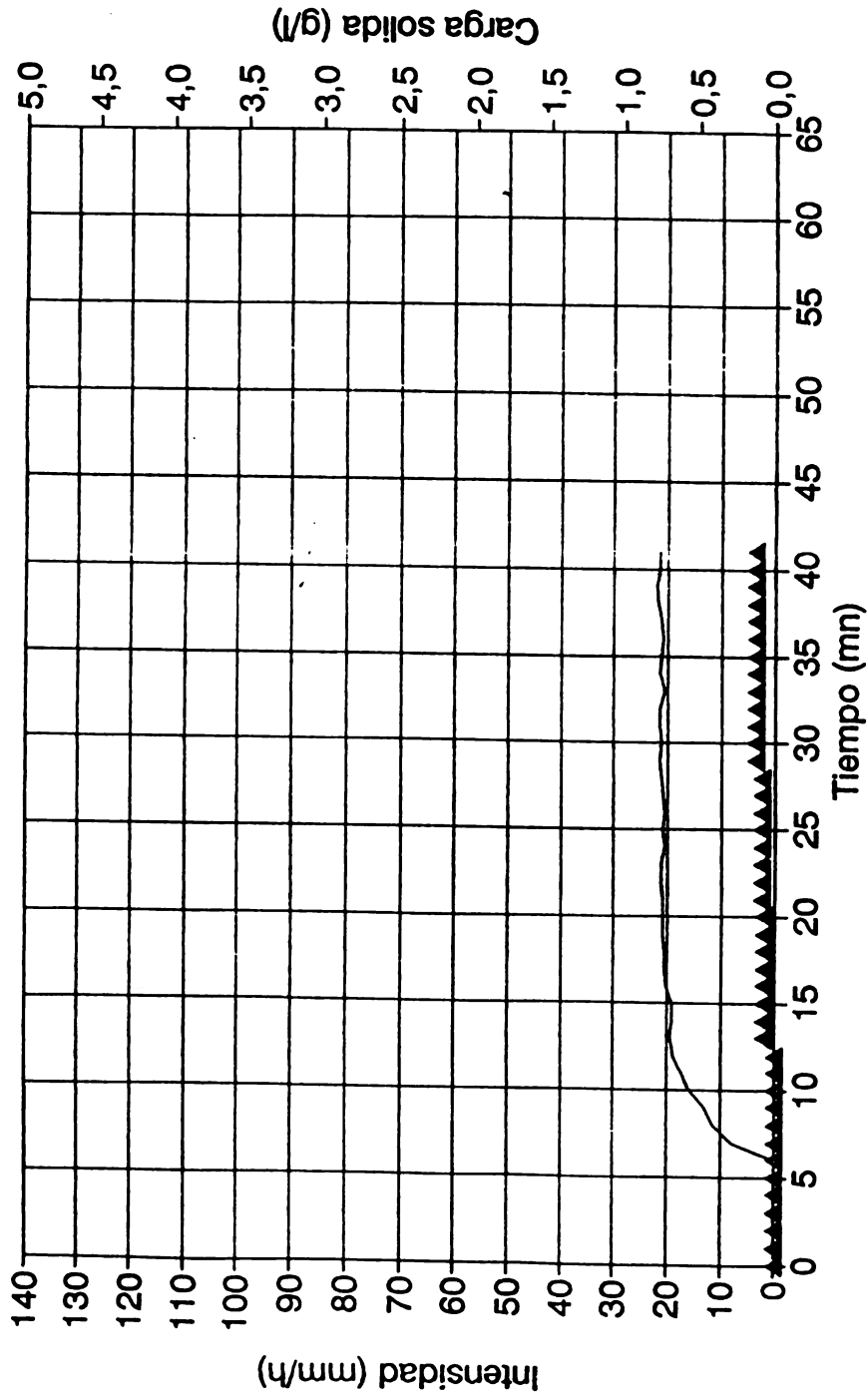
— Ecurrimiento — Intens. lluvia ▲ Carga solida

11 Simulación de lluvia - JUAN25 pastos / ta max. / I = 61,3mm.h-1



— Ecurrimiento — Intens. lluvia ▲ Carga solida

12 Simulación de lluvia - JUAN29 maíz / ta max. / I = 60,0mm.h-1



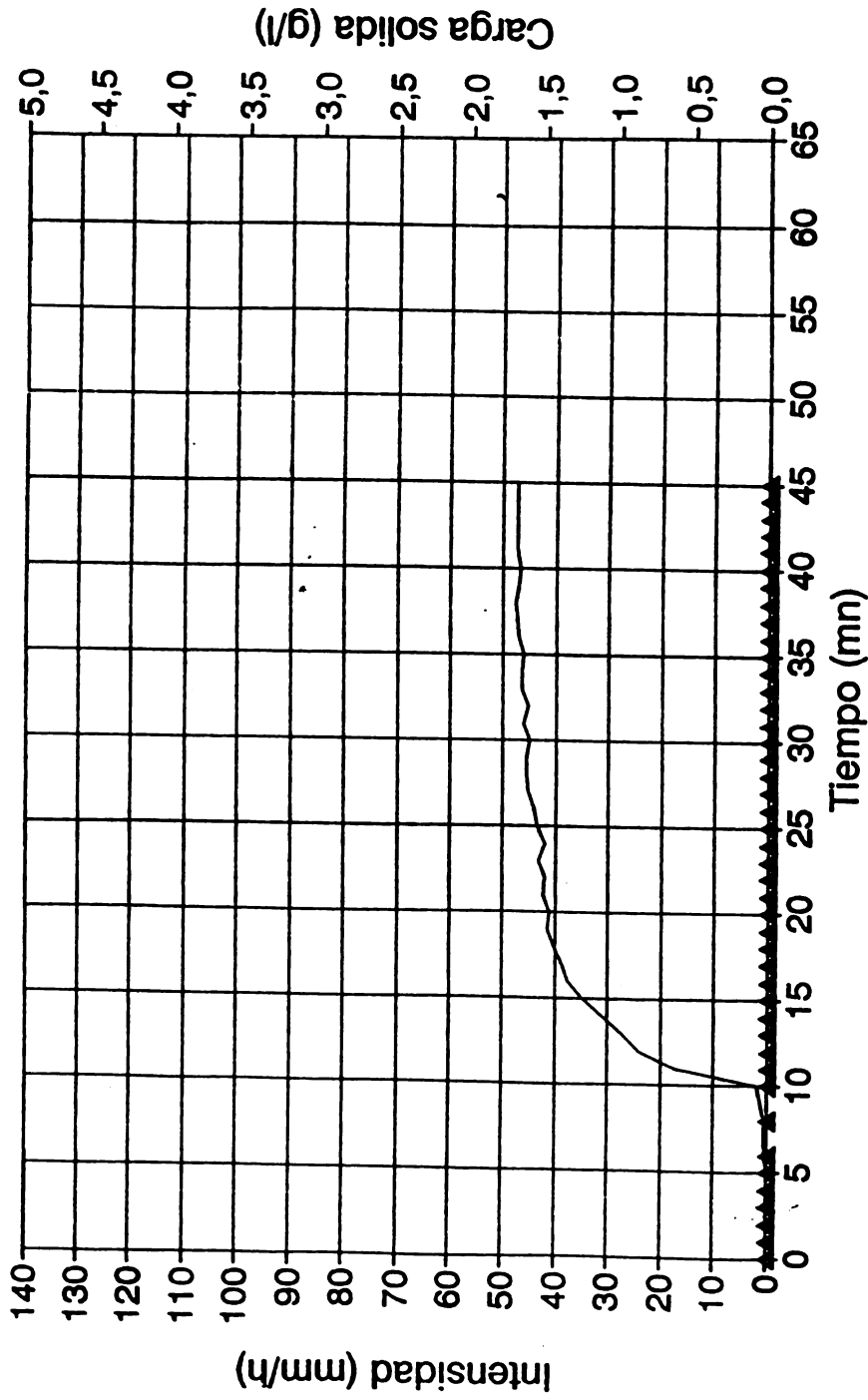
— Escurrimiento — Intens. lluvia ▲ Carga solida

13 Melanudands de San Juan Sur: resumen de las situaciones y de los datos

Cuadro II: 5 situaciones experimentales de los Melanudands de San Juan Sur, pendientes #31%, Im lluvias # 60mm.h-1

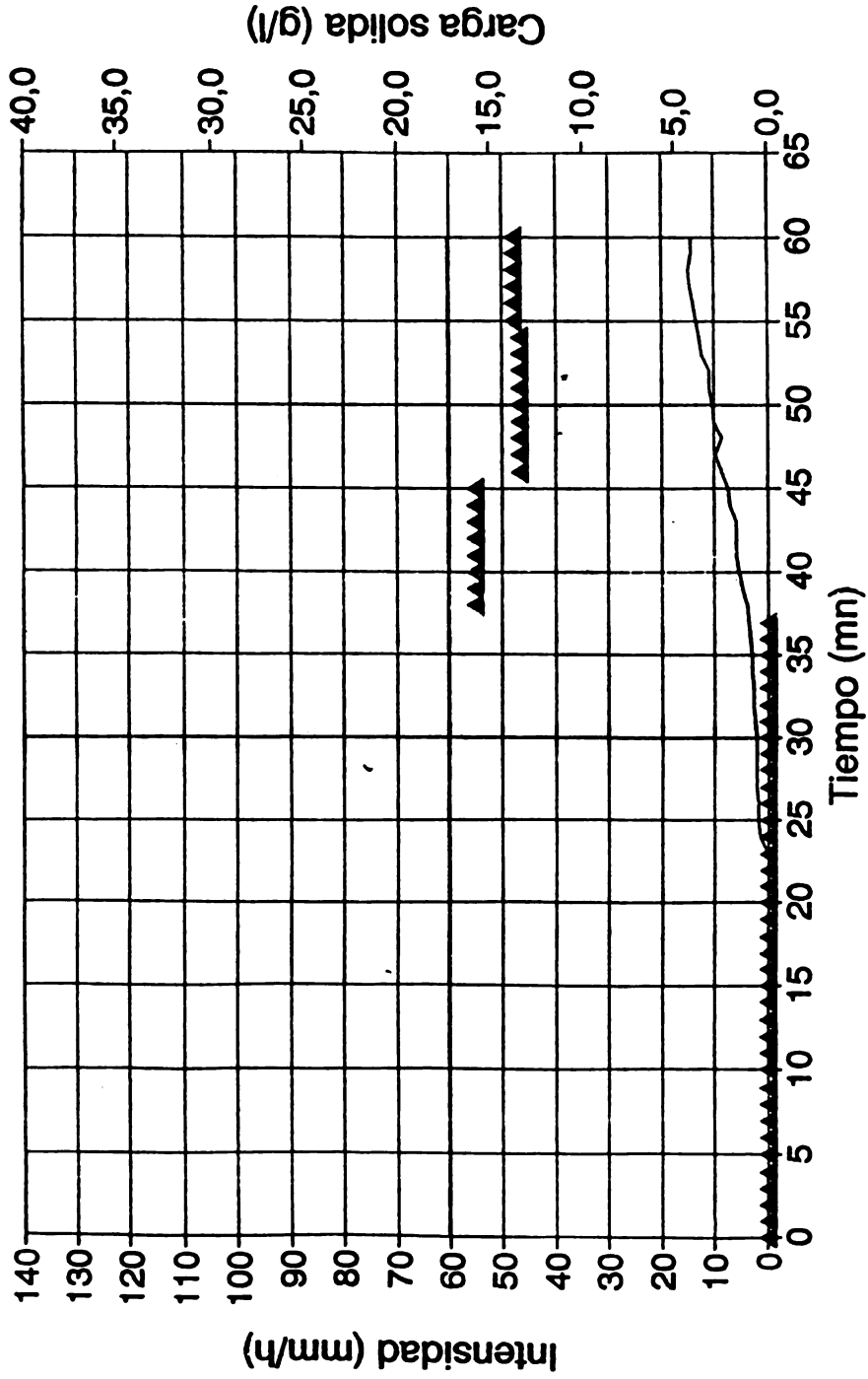
JUAN01, desnudada,	ta max.,	Im = 60,8mm.h-1					
JUAN02, desnudada,	ta 20min.,	Im = 60,8mm.h-1					
JUAN07, sistema agroforestal,	ta max.,	Im = 60,8 mm.h-1					
JUAN25, 100% pastos,	ta max.,	Im = 61,3mm.h-1					
JUAN29, 80% maíz,	ta max.,	Im = 60,0mm.h-1					
	SPu mm	Pi mm	Rx mm.h-1	SLr mm	SLi mm	Kr %	MIT t.ha-1
JUAN01	60,8	19,5	40	22,8	37,9	37,6	3,86
JUAN02	20,3	1,0	47	14,2	6,1	70,1	2,44
JUAN07	62,3	5,4	6	5,0	57,3	8,0	0,00
JUAN25	41,0	8,2	24	11,0	30,0	27,0	0,04
JUAN29	41,0	6,2	22	11,5	29,5	28,1	0,06

14 Simulación de lluvia - RETES16 pastos / ta max. / I = 59,9mm.h-1



— Ecurrimiento — Intens. lluvia ▲ Carga solida

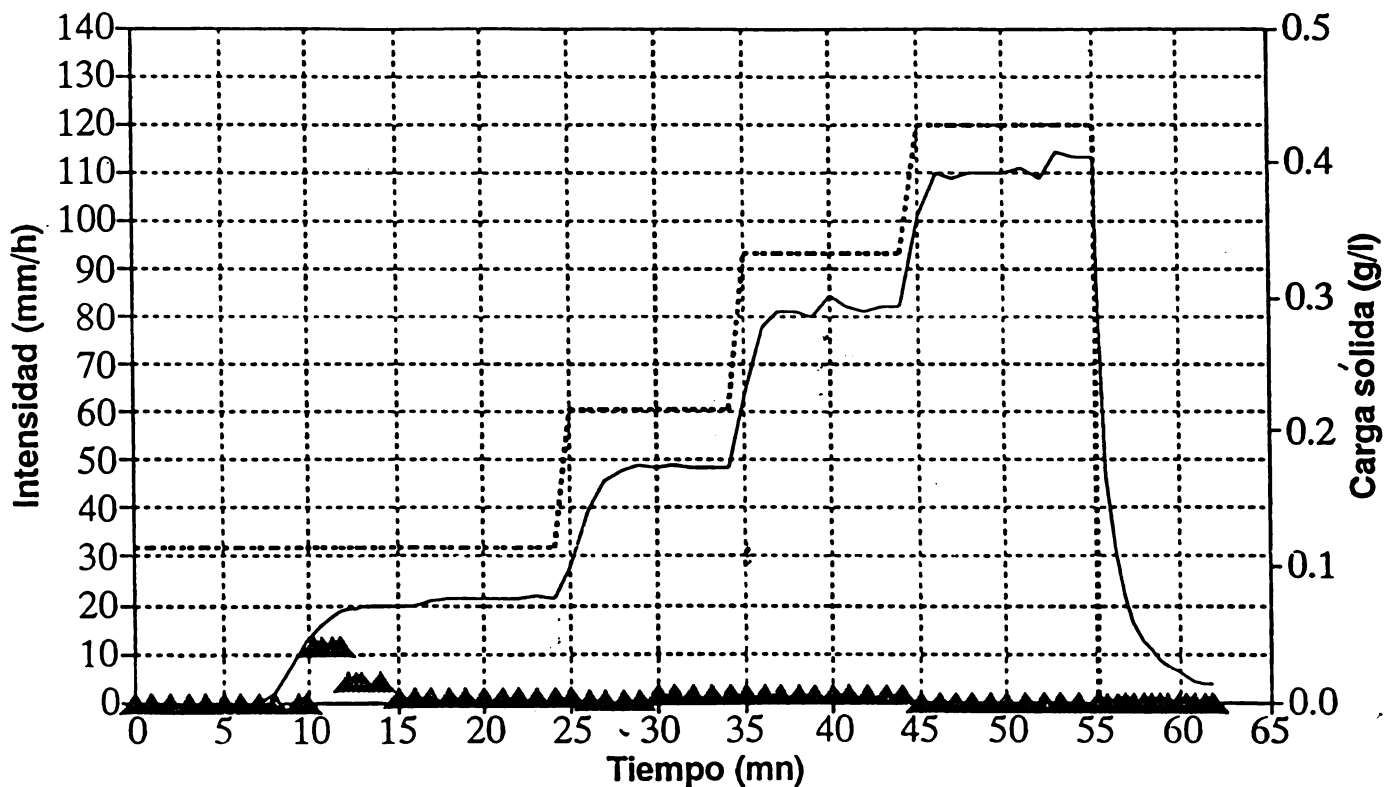
15 Simulación de lluvia - RETES04 desnudada / ta max. / I = 60,3mm.h-1



— Ecurrimiento — Intens. lluvia ▲ Carga solida

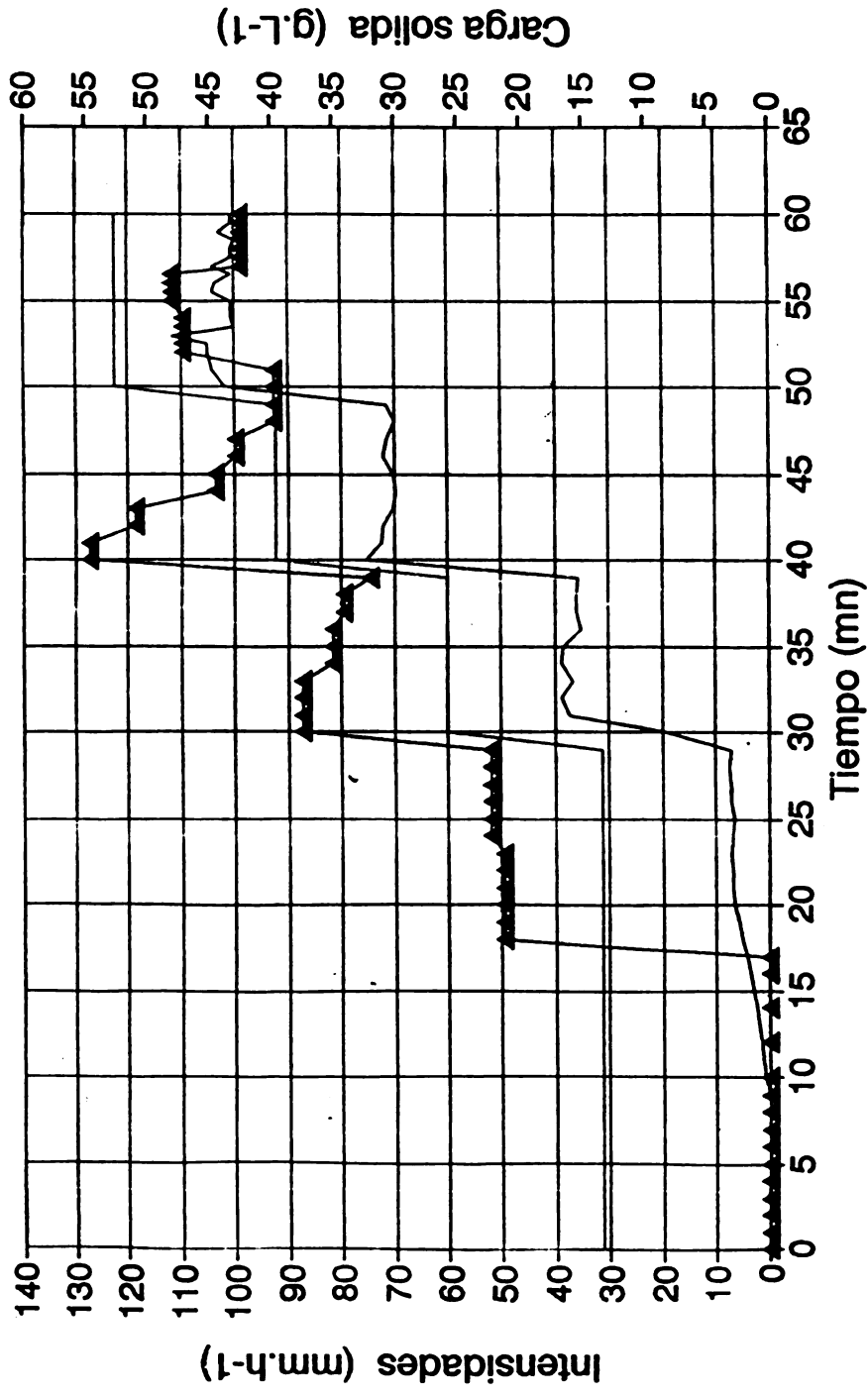
16 Simulación de lluvia - RETES22

pastos / ta 30min. / I = 30, 60, 90, 120mm.h-1



— Escurrimiento Intens. lluvia ▲ Carga sólida

17 Simulación de lluvia - RETES12 desnuda / ta 30min. / I = 30, 60, 90, 120mm.h



— Escurrimiento — Intens. lluvia ▲ Carga solida

18 Udivitrands del volcán Irazu (finca Retes): resumen de las situaciones y de los datos

Cuadro III: 4 situaciones experimentales de los Udivitrands del Irazu, pendientes #34%, Im # 60mm.h-1 y variables

RETES16, 100% pastos, ta max., Im = 59,9mm.h-1
 RETESC4, desnudada, ta max., Im = 60,3mm.h-1
 RETES22, 100% pastos, ta 30min., Im = 30, 60, 90, 120mm.h-1
 RETES12, desnudada, ta 30min., Im = 30, 60, 90, 120mm.h-1

	SPu mm	Pi mm	Rx mm.h-1	SLr mm	SLi mm	Kr %	MIT t.ha-1
RETES16	42,9	8,0	47	24,6	18,3	57,4	0,00
RETES04	60,3	23,0	14	4,3	56,0	7,1	3,10
RETES22	60,3	3,5	21 48 83 110	51,6	8,7	85,6	0,01
RETES12	75,6	5,3	8 38 70 103	50,0	25,5	66,0	129,80