

Métodos Experimentales para el Seguimiento y Estudio de la Erosión Hídrica

Recibido para evaluación: 22 de Abril de 2003

Aceptación: 20 de Junio de 2003

Recibido versión final: 04 de Julio de 2003

Juan Diego León Peláez¹

RESUMEN

Se describen algunos métodos sencillos, para el estudio de la erosión hídrica en condiciones de campo. Se incluyen, entre otros, métodos para el registro de variaciones en el nivel de la superficie del terreno, para la medición de la escorrentía superficial y para la medición de la salpicadura.

PALABRAS CLAVE: Erosión Hídrica, Estudio de la Erosión, Escorrentía Superficial, Erosión por Salpicadura, Estacas de Erosión, Cajas Gerlach, Tazas de Salpicadura

ABSTRACT

Some simple methods for studying hydric erosion under field conditions are described. They include methods for detecting soil surface variation, for measuring runoff, and for measuring rain splash.

KEY WORDS: Water Erosion, Erosion Survey, Runoff, Rain Splash, Erosion Pins, Gerlach Troughs, Splash Cups.

*1. Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín.
jdlecn@unalmed.edu.co*

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación directa del suelo a actividades productivas, caso de la agricultura o el pastoreo, requiere de sustancias nutritivas para el adecuado desarrollo de plantas y pastos; la mayor o menor concentración y disponibilidad de tales sustancias, refleja el nivel de fertilidad de un suelo, sin embargo, es en la capa más superficial de éste, donde se concentra la mayor fertilidad. A pesar de la importancia que tiene esta capa superficial de suelo, como producto de la adopción de sistemas de manejo tecnológico inadecuados y de apropiación del recurso, en actividades agrícolas, pecuarias y forestales, se pierden grandes cantidades de él.

Adicionalmente, pérdidas de suelo de gran significado, se derivan de la ejecución de proyectos de desarrollo (carreteras, ferrocarriles, aeropuertos, grandes presas, etc.), cuya inadecuada gestión en el pasado generó importantes impactos ambientales, y en algunos casos los sigue produciendo en la actualidad. De similar forma, no deben subestimarse las importantes repercusiones que han tenido en la generación del fenómeno erosivo, actividades consideradas tradicionalmente como artesanales, caso de la minería de superficie, cuya manera particularmente deletérea de intervenir el terreno, genera importantes focos erosivos. Así, las superficies de terreno que han soportado el desarrollo de esta actividad extractiva, quedan desprovistas de cubierta vegetal y seriamente afectadas en sus propiedades químicas y físicas, a merced de la lluvia, y con mínimas posibilidades de un oportuno cubrimiento vegetal por regeneración espontánea.

A pesar del impacto derivado de los grupos de actividades recién señaladas, es indiscutible la importancia de aquel generado por la utilización tradicional de la tierra, a efectos de la implementación de cultivos y sistemas de pastoreo a nivel mundial, lo cual se soporta por una parte en la extensión de tales prácticas productivas, y por otra, derivada de la anterior, en la dependencia económica a diferentes niveles. Con respecto a la primera, puede anotarse que de las tierras de uso agropecuario, aproximadamente una tercera parte se dedica a cultivos y las partes restantes a pastos, y que de ellas cerca de un 80% sufre niveles moderados y severos de erosión, y un 10% erosión leve (Müller y Castillo, 1997).

Con relación a la segunda, debe reconocerse la fuerte dependencia económica que tales formas de aprovechamiento tienen de los suelos y de su capacidad productiva; dada dicha relación de dependencia, y los múltiples actores involucrados, se deducen las importantes consecuencias que pueden derivarse de los procesos de desgaste y pérdida de suelo. Así, en un sistema económico, las pérdidas monetarias -derivadas a su vez de las pérdidas de productividad de cultivos, o de la aplicación excesiva de insumos buscando compensar la disminución de la fertilidad de los predios agrícolas- no sólo afectarán al parcelario o pequeño agricultor y su economía familiar, sino además se trasladarán probablemente al sistema macroeconómico del país, de acuerdo a la importancia que tenga para una economía nacional, el renglón productivo en cuestión. Así, el desarrollo de una localidad, región, departamento y nación, puede verse seriamente afectado por la aparición y posterior avance de este proceso de desgaste y pérdida.

En términos prácticos, vale la pena detenerse en dos aspectos que deben motivar y apoyar el estudio de la erosión: el desbalance existente entre la tasa de formación y de pérdida de suelo, y las pérdidas económicas que implica el fenómeno erosivo, en forma tanto directa como indirecta.

2. TASA DE FORMACIÓN Y TASA DE PÉRDIDA DEL SUELO

La gran diferencia existente entre la tasa de formación y de pérdida del suelo, motiva la ejecución de estudios sobre cuyos resultados se respalden programas de prevención de la erosión en sus diferentes formas; en esta dirección apunta la definición de una tasa tolerable de pérdida de suelo, más conocida como valor T^2 en la literatura especializada. La definición de este término, en la práctica, resulta compleja, y de hecho en el tiempo ha sido variable, pasando por enfoques soportados en la fertilidad de suelos; en su profundidad; o en consideraciones económicas. Sin embargo, en términos generales, puede adoptarse la definición dada por Wischmeier y Smith (1978) para el concepto de Tolerancia de Pérdidas de Suelo: "máximo nivel de erosión del suelo que permite un elevado nivel de productividad del cultivo, sostenible económica e indefinidamente".

2. Traducción al español del término "T value"

La principal dificultad que emerge de esta cuestión, es la acotación del máximo nivel de erosión permisible, el cual a su vez está condicionado por la tasa de formación del suelo. Johnson (1987) estimativos de varios autores acerca de la tasa de formación del suelo, desde distintas ópticas: bajo condiciones ideales de manejo del suelo, éste podría formarse a una tasa de una pulgada en cerca de 30 años, es decir, cerca de $0,8 \text{ mm año}^{-1}$ (Hudson, 1971); bajo condiciones naturales, la tasa de formación podría ser de una pulgada en un rango que oscila entre 300 y 1.000 años (Pimentel et al., 1976); bajo prácticas agrícolas normales, la tasa de formación puede ser de 25 milímetros en 100 años ($0,25 \text{ mm año}^{-1}$) (Ibid.). Por su parte, Morgan (1986) considera que una tasa de formación adecuada para un suelo agricolamente productivo, es del orden de $0,1 \text{ mm año}^{-1}$, equivalente a $0,1 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ($1 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), asumiéndose una densidad del suelo de $1 \text{ Mg}^3 \text{ m}^{-3}$ y basándose en estimativos de meteorización de las rocas.

Otro enfoque dado a la formación del suelo y definición del máximo nivel de erosión permisible, se acoge no a la meteorización de la roca como tal, sino mejor a la tasa de acumulación de materia orgánica. Así, Johnson (1987) expone los planteamientos hechos al respecto por Hall et al. (1982), según quienes bajo cobertura forestal o herbácea, la materia orgánica puede acumularse rápidamente, de tal forma que dichas acumulaciones tienen lugar en unos 10 años, y un estado de equilibrio entre ganancias y pérdidas puede alcanzarse en unas pocas centurias.

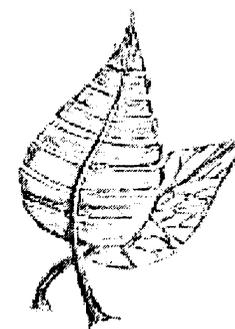
En términos generales, las pérdidas tolerables de suelo, rondan las 11 ton ha^{-1} (Johnson, 1987), dado que se ha aceptado la proximidad de dicho valor a la tasa máxima de desarrollo del horizonte A bajo condiciones óptimas. Esta cifra podría distanciarse de la realidad en áreas donde las tasas de erosión son naturalmente altas (Morgan, 1986), como es el caso de terrenos montañosos con alta precipitación, y que se correspondería por tanto con las condiciones generales de América Tropical. De hecho, ésta se encuentra dentro de los reportes más dramáticos en términos de pérdida de suelo, así (Müller y Castillo, 1997) en el concierto internacional, los niveles más altos de erosión se tienen en Asia, África y Suramérica, con valores promedios entre 30 y $40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; sin embargo, en ocasiones pueden alcanzarse valores promedios inusualmente elevados como los 90 Mg ha^{-1} reportados por Dequi et al. (1981) para Huang He, China.

Tales cifras, comparadas con las de formación de suelo, son abismalmente diferentes, pudiendo alcanzar éstas valores de $1 \text{ a } 2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; asimismo, la cifra inicialmente referida, supera los niveles tolerables de pérdida bajo criterios económicos y ecológicos, comúnmente reportados entre $0,2 \text{ y } 5,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para zonas montañosas con suelos superficiales. Bajo tales circunstancias, se ha sugerido la adopción de un valor cercano a $2,5 \text{ kg m}^{-2}$ (25 ton ha^{-1}), el cual se encuentra cerca de los sugeridos por Tosi (1972) para las formaciones ecológicas húmedas y muy húmedas, de varios pisos altitudinales de Colombia.

La comparación de las tasas de formación y de pérdida de suelo bajo tales condiciones climáticas y topográficas del trópico, dibuja un serio problema de sostenibilidad a las intervenciones del territorio destinadas a su aplicación a la agricultura o al pastoreo; de ello se tiene clara manifestación en territorio colombiano, en donde se da una utilización de la tierra que supera la vocación propia de ella o capacidad de uso (IGAC, 1988), y que ha dado origen a diferentes grados de expresión del fenómeno erosivo.

3. COSTOS ECONÓMICOS DERIVADOS DE LAS PÉRDIDAS DEL SUELO

Los reportes de pérdidas de suelo, si bien resultan dramáticos conforme a las comparaciones establecidas con las tasas de formación de suelo, lo son aún más una vez se hace su valoración económica. Así, diferentes estimativos en los Estados Unidos de América –en adelante EUA– indican pérdidas económicas que oscilan entre 500 millones y 1 billón de dólares anuales. Al respecto, Colacicco et al. (1989) resumen algunos de los principales aspectos, de estudios relacionados con tales pérdidas económicas en este país, dentro de las cuales cabe destacar las siguientes: el costo total de la erosión se estima entre 1,7 y 1,8 billones de dólares, e incluye el costo en su control, estando el costo total para un año particular (1983) en el rango 525-588 millones



3. Megagramo: Equivalente a Tonelada métrica

de dólares, distribuidos en costos por pérdidas de productividad de los cultivos (420 millones) y pérdidas por fertilización (105-168 millones) (Crosson y Stout, 1983; Crosson, 1986). Los autores mencionan, además, los daños estimados por Benbrook *et al.* (1984) por concepto de erosión laminar y en surcos, calculados en 900 millones de dólares anuales, y costos de 1 billón por año a la tasa actual de erosión, estimados por Myers (1985).

Relacionando estas cifras, con las de pérdidas tolerables de suelo (Valor T), se tiene que la concentración de daños económicos ocurre en forma especial, cuando las tasas de pérdida son superiores a 3T, lo cual corresponde a cerca del 13% de las tierras cultivadas de EUA, pero que representan más de la mitad del daño económico total; así, más del 80% de los daños que superan los 10 dólares acre⁻¹ año⁻¹ (unos 25 dólares ha⁻¹ año⁻¹), ocurren en tierras que se erosionan a tasas superiores a 3T (Colacicco *et al.*, 1989).

Las cifras hasta aquí citadas corresponden a los daños económicos causados por la erosión en fincas o predios rurales⁴, y que comprenden el valor de la reducción de las cosechas, y los incrementos en costos derivados de la mayor necesidad de aplicación de insumos, como fertilizantes. A estos tendría que sumarse la afectación del valor de la tierra, cuya devaluación conjunta representa cerca del 1% del valor total de la superficie agrícola útil de EUA (Ibid.).

Además de los daños recién mencionados, y que ocurren dentro del predio y afectan por tanto en forma directa a quien le da uso, cabe diferenciar otros que ocurren por fuera del entorno inmediato y que se conocen como daños externos o lejos del predio⁵; entre éstos se tiene el deterioro de superficies de agua que impide el desarrollo de actividades o bien recreativas, o bien productivas. Asimismo afecta la vida útil de grandes proyectos como es el caso de embalses para la generación hidroeléctrica, e incrementa el riesgo de inundaciones. La importancia de estos daños estriba en que en conjunto, pueden superar con creces los daños generados directamente en los predios.

El caso de América Tropical, si bien no se indican cifras económicas relacionadas con los daños, se estima en extremo delicado, dadas las elevadas tasas de pérdida de suelo reportadas para la región –inicialmente expuestas- y el avanzado estado de desarrollo del fenómeno en ciertos lugares de ella. A este último respecto, aún cuando estimado para América del Sur, se reportan (PNUMA, 2000) casi 250 millones de hectáreas de terreno afectadas por la degradación del suelo, siendo la erosión la principal amenaza con 68% del terreno afectado; unos 100 millones de hectáreas se han degradado como consecuencia de la deforestación, en tanto que unos 70 millones de hectáreas se han visto sometidas a procesos de pastoreo intensivo.

De la exposición se desprende la importancia que tiene la obtención de un buen nivel de entendimiento del fenómeno erosivo, de cara a su empleo en la formulación de políticas, programas y proyectos, para su prevención y control; la adecuada realización de estos estudios, articulados por su parte a las necesidades de gestión de entidades territoriales y de diferentes instancias relacionadas con la gestión ambiental, conduciría al actualmente necesario fortalecimiento del binomio investigación-gestión.

4. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE SUELO

La estimación de pérdidas de suelo, representa una importante herramienta a los efectos de la planificación del uso de la tierra, en el marco de la gestión ambiental. El montaje de unidades experimentales en campo –tratadas aquí bajo la denominación métodos directos- permite la generación de información con base en la cual, puede hacerse la modelación del fenómeno, a través de expresiones matemáticas –denominadas aquí como métodos indirectos-, usualmente de tipo paramétrico; con éstas es posible hacer estimaciones indirectas de las pérdidas de suelo, lo cual se traduce en importantes ahorros de tiempo y dinero, que son a su vez característicos de los primeros métodos. Por otra parte, la información proveniente de ensayos de campo, en ocasiones no se emplea para “alimentar” tales expresiones matemáticas, sino que hace parte de trabajos de investigación de reconocida importancia, dada a su vez la revestida por un fenómeno como el tratado, y que sirven a los propósitos de la toma de decisiones, y en general, de la gestión.

⁴ Traducción al español del término "On-farm damages"

⁵ Traducción al español del término "Off-farm damages"

4.1. Métodos Indirectos

A efectos de la estimación de pérdidas de suelo, la modelación del fenómeno representa una importante herramienta, para su posterior aplicación en los procesos de planificación del uso de la tierra en forma clara, ordenada y además, viable económicamente. Sin embargo, es claro que su obtención depende en buena medida, de la información recolectada en experimentaciones de campo, y que tales modelos no son por ello, de carácter estático, sino mejor configuran un cierto dinamismo, conforme se adquieren nuevas comprensiones del fenómeno, que se integran a los modelos obtenidos, o simplemente, se amplían las bases de datos que los soportan.

Cabría destacarse dentro de los modelos, básicamente dos tipos (Morgan, 1979): los determinísticos y los paramétricos; los primeros están basados en ecuaciones matemáticas a objeto de describir los procesos involucrados en el modelo, tomando en consideración las leyes de conservación de la materia y energía. Por otra parte, los modelos de tipo paramétrico, se basan en la identificación de relaciones estadísticamente significativas entre variables, que se asume son importantes, cuando se cuenta con una razonable base de datos; aquí son reconocidos tres tipos de análisis (ibid.):

- i. De caja negra: donde sólo son estudiadas las entradas y salidas principales
- ii. De caja gris: donde se tiene conocimiento en algún detalle de cómo trabaja el sistema
- iii. De caja blanca: donde todos los detalles acerca de cómo opera el sistema son conocidos.

La mayor parte de los modelos usados en estudios de erosión del suelo, son de tipo paramétrico de caja gris, basándose así en la definición de los factores más importantes, en su medición, y en su relación con las pérdidas de suelo, mediante empleo de técnicas estadísticas.

Se destaca dentro de los modelos de tipo paramétrico, en primer lugar, la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo⁶ –EUPS- dada su extendida aplicación a lo largo y ancho del mundo –aunque de mayor importancia en Norteamérica- donde tuvo origen; y su versión revisada⁷ –EUPSR- ya de menor atractivo por la introducción de mejoras al modelo original, que le restan por otra parte versatilidad y sencillez.

Deben además mencionarse, la metodología desarrollada por Tosi (1972), para la estimación de pérdidas de suelo, cuyo principal atractivo reside en su aplicabilidad en las condiciones propias a las latitudes tropicales; y la propuesta por Morgan *et al.* (1984) para la valoración del riesgo de erosión, que supera a los anteriores dada la estimación, que en forma adicional, se puede hacer a través suyo, de la escorrentía media anual.

La modelación de la erosión incluye, además, el enfoque de cuencas hidrográficas -producción y carga de sedimentos en corrientes de agua- y los efectos del viento -erosión eólica- entre otros.

4.2. Métodos Directos

La estimación de pérdidas de suelo por métodos directos, implica el montaje de ensayos en campo con mediciones frecuentes o periódicas; si bien las pérdidas calculadas corresponden al fenómeno conforme éste ocurre en la realidad, las técnicas para su estimación son muy variadas, y en función de ello lo es asimismo su confiabilidad. Las ventajas en términos de precisión que se derivan de los ensayos directos en campo son claras, como asimismo lo resulta por contrapartida, que en tanto más preciso sea el método, se requerirá, usualmente, de una mejor dotación en términos de infraestructura técnica, conllevando una mayor inversión económica.

De aquí que en función de los objetivos del trabajo de investigación, se optará por uno u otro dispositivo de medición, así como por la adopción de una logística de registro en el tiempo y diseño experimental (frecuencia de muestreo, número de repeticiones, etc.), de tal forma que se obtengan los más precisos y confiables resultados, al menor costo. Al respecto de la precisión y errores de estimación, debe dejarse indicado (Morgan, 1986) que las mediciones están sujetas a errores; así,

6. Traducción al español de la expresión original "Universal Soil Loss Equation" o USLE.

7. En su versión original: "Revised Universal Soil Loss Equation" o RUSLE

dado que ninguna medición simple de pérdidas de suelo puede ser considerada como un valor absolutamente correcto, es virtualmente imposible cuantificar los errores. Sin embargo, estos pueden ser calculados con respecto a la variabilidad, lo cual requiere la replicación del experimento varias veces para determinar el valor medio de pérdidas de suelo y el coeficiente de variación de los datos.

El estudio de la erosión en condiciones de campo, es fundamental, dada la trascendencia que adquiere la investigación por medios directos, de cara al suministro relativamente rápido de información, que sirva especialmente a los propósitos de prevenir la erosión.

A continuación se mencionan y describen algunos de los métodos directos de mayor sencillez y empleo extendido, para la estimación de pérdidas de suelo promovidas por el agua, dada la importancia que éstas revisten en los trópicos húmedos, en sus formas de salpicadura y escorrentía superficial, sobre laderas de colinas y montañas.

Si bien uno de los métodos usualmente empleado para la determinación de las tasas de erosión de suelos, es el de medición de la cantidad de sedimentos, sedimentos en suspensión y carga de lecho exportado de una cuenca por una corriente u arroyo, éstos no se incluyen en la exposición. Es necesario en todo caso advertir su importancia, especialmente en su aplicación a estudios realizados sobre la base de la cuenca hidrográfica y usos de la tierra. De manera análoga, no son abordadas aquellas técnicas empleadas para la evaluación de la erosión eólica.

4.2.1 Medición de variaciones del nivel superficial.

Las técnicas basadas en el registro de los cambios en el nivel de la superficie del terreno, son especialmente útiles cuando se trata de pérdidas de suelo elevadas, o cuando éstas se encuentran concentradas en áreas relativamente pequeñas. Se trata de técnicas de registro volumétrico, mediante las cuales son medidas las variaciones de la microtopografía del terreno, producto de los procesos de agradación (acumulación) y degradación (pérdida).

4.2.1.1 Estacas de erosión

El método más ampliamente utilizado es el de las "estacas de erosión"⁸ o "estacas con arandela"⁹. Se ha propuesto (Hudson, 1982) el empleo de clavos de acero de 30 cm de longitud, de tal forma que las diferencias de altura entre la parte superior del clavo y el nivel del suelo, representan el nivel de pérdidas de éste. Otros autores recomiendan longitudes que varían entre unos pocos decímetros y 1 m, de cara a su fijación con firmeza en el suelo.

Con respecto a su grosor y forma, se destaca que éstas deben ser lo más delgadas posible, en atención a las alteraciones potenciales sobre las corrientes locales, al presentarse obstáculos sobre el terreno, sugiriéndose además que sean lisas en su superficie. Tomando como base el material de construcción, se proponen (Gómez, 1996) diferentes dimensiones de las estacas; así, para estacas metálicas se sugiere un ancho de 2 cm y un grosor de 0.2 cm, y para estacas en madera secciones de 2x2 cm o 2 cm de diámetro. Dentro de estos rangos de tamaño se sitúan los reportados por Chinen (1987), quien empleó estacas de 1 cm de diámetro y 50 cm de longitud, para registrar el descenso del nivel del piso tras la ocurrencia de un incendio forestal.

Parece ser que (Homung, 1990) estacas delgadas, entre 4 y 6 mm de diámetro, son las más adecuadas para la mayoría de situaciones, en tanto que longitudes de 50 a 60 cm serían las óptimas; sin embargo, en algunos suelos podría ser imposible garantizar la colocación a tales profundidades.

Para su disposición en terreno, las estacas se deslizan a través de una arandela grande, siendo el conjunto introducido verticalmente con la cara inferior de la arandela a nivel de la superficie del terreno; la arandela debe tener unos cuantos centímetros de diámetro con el orificio central un poco mayor que el grosor de la estaca o clavo, de tal forma que la arandela se mueva libremente, y pueda por tanto descender conforme avance el proceso degradativo, si es éste el que tiene lugar. Es conveniente (Gómez, 1996) el biselado de uno de sus extremos, haciéndose una ranura a 15 cm de éste o introduciéndose un clavo, a partir del cual se marcan hacia arriba y hacia abajo, 10 pequeñas ranuras separadas entre sí 1 cm; las estacas se introducen en el suelo por su extremo

⁸ Traducción al español del término "erosion pins".

⁹ Traducción al español del término "pin with washer".

biselado, hasta que la ranura o clavo queden en contacto con la superficie del terreno.

El método se destaca por su sencillez, comodidad y economía, de cara al monitoreo de procesos erosivos y de interrelaciones planta-suelo a nivel superficial; así por ejemplo, en el caso de cárcavas, su evolución en profundidad puede ser rastreada a través del clavado en su fondo o lecho, de estacas con arandelas, evidenciándose o bien procesos de acumulación conforme sea cubierta la arandela por el suelo removido y transportado, o bien procesos de pérdida, conforme descienda aquella. Asimismo, tomando en consideración que para medir la evolución de una cárcava es necesario no solamente incluir la profundidad, sino además sus restantes dimensiones en la horizontal, pueden ser empleadas líneas de estacas a distancias fijas de ella, repitiéndose las mediciones a intervalos regulares para establecer la tasa a la que evolucionan sus bordes.

Las estacas son asimismo de gran utilidad para el monitoreo de movimientos en masa lentos, en donde a partir de la medición en el tiempo, de la variación de la distancia entre el conjunto de las estacas, es posible evaluar la velocidad y dirección de la masa en movimiento, permitiendo a su vez este último, definir la posición que habrán de ocupar las estructuras de contención (Gómez, 1996).

En el caso de evaluación de diferentes cubiertas vegetales, de acuerdo a su tipo dependerá el número y distribución espacial de las estacas; así son recomendados (Ibid.) arreglos de ellas en cuadrícula a distancias hasta de 10 m, en el caso de evaluación de usos o manejos específicos, tales como pastos o bosques. Las estacas han sido colocadas bajo distintos arreglos, además del de cuadrícula; así por ejemplo, se han dispuesto a lo largo de transectos o como pequeños grupos aleatorios. Los transectos han sido más ampliamente usados, especialmente sobre pendientes o a lo largo de situaciones específicas –caso de cárcavas– siendo el espaciamiento a lo largo del transecto, o bien regular o bien variable (Hornung, 1990).

Para la evaluación de pérdidas de suelo en bosques tropicales, el método de estacas ha sido empleado en Altamira, Brasil (Fearnside, 1978, citado por McGregor, 1980) y en Malasia (Leigh, 1978), siendo encontradas tasas de erosión del orden de 7,5 y 2,6 mm año⁻¹ respectivamente¹⁰.

Para la frecuencia de registro y tratamiento analítico respectivos, se recomiendan (Gómez, 1996) períodos decadales (10 días) por un tiempo mínimo de 1 año; con tales registros se podrán calcular las pérdidas o acumulaciones en términos de peso, correspondiendo cada situación –pérdida o acumulación– a una altura, que para el conjunto de estacas origina una altura promedio, dato que junto al del área de trabajo, permite determinar el volumen de suelo perdido. Con este valor, y la densidad aparente del suelo, es posible calcular la pérdida en términos de peso, siendo para el efecto propuestas por el autor en mención, la expresión y unidades siguientes:

$$SP = V \times D_a$$

Donde V es el volumen de suelo (m³), D_a es la densidad aparente (Mg m⁻³) y SP es el suelo perdido (Mg m⁻² llevado a Mg ha⁻¹). Las estacas han sido remedidas en una variedad amplia de intervalos, desde siete días hasta un año, dependiendo de la tasa de erosión y de los objetivos del proyecto. Los intervalos de tiempo más comúnmente empleados son semestrales o anuales, sin embargo, se sugiere que donde la erosión hídrica esté siendo monitoreada, las mediciones sean realizadas después de cada episodio principal de escorrentía superficial (Hornung, 1990).

Los datos que provienen de estacas, pueden ser empleados para construir un perfil de la superficie o para calcular una tasa promedio de su disminución (degradación del terreno). Sin embargo las interpretaciones de las mediciones deben ser cuidadosamente realizadas, ya que, por ejemplo, valores de incremento o decremento en la cantidad de estaca expuesta, podrían no necesariamente indicar la ocurrencia de procesos de desgaste o de acumulación, respectivamente. Estas situaciones podrían generarse como resultado de procesos de humedecimiento y secado del suelo, o de expansión y contracción de minerales arcillosos por cambios en el estado de humedad (Ibid.).

A pesar de las ventajas del método, debe señalarse (Temple, 1972), que si bien se trata quizás del de más fácil implementación para la evaluación de pérdidas de suelo, entre los usualmente empleados, las mediciones son en ocasiones de difícil interpretación, aún cuando éstas sean tomadas

¹⁰. Un valor de pérdidas de suelo de 1 mm año⁻¹ equivale a 2 ton ha⁻¹ año⁻¹ (McGregor, 1980)

cuidadosamente, y la localización de las estacas bien diseñada. El método encuentra su mejor ámbito de aplicación en aquellos sitios donde la erosión es relativamente rápida y donde se requieren estimativos de las pérdidas totales de suelo.

4.2.1.2 Marcos de medición

Otra aproximación para la estimación de pérdidas de suelo, basada en el registro de variaciones del nivel superficial, es obtenida mediante empleo de marcos o bastidores de medición¹¹.

La técnica recurre a marcos o bastidores que permiten las mediciones de la altura relativa de la superficie del terreno en puntos fijos, ya sea en un arreglo en malla (rejilla) o a lo largo de un transecto.

El bastidor es usualmente colocado sobre varillas o estacas fijadas sobre el terreno. Luego, a través de orificios hechos sobre el marco, se introducen varillas de medición hasta tocar con sus extremos el nivel superior del terreno. La distancia desde el marco hasta dicho punto, es medida en cada posición o varilla de medición, o alternativamente, desde el marco hasta el extremo superior de la varilla (Hornung, 1990).

Una de estas estructuras, elaborada por Lam (1977), se muestra en la Figura 1. Ésta consistió de un marco de aluminio de 1,8 cm, con 16 perforaciones hechas en el marco, cada 15 cm. Los marcos se dispusieron sobre varillas de acero permanentes, y con los datos recogidos se obtuvieron perfiles de las pendientes.

Dentro de sus ventajas se cuentan su simplicidad y relativo bajo costo. Por contrapartida, la recolección de datos en campo consume mucho tiempo, y debe tenerse cuidado especial en no alterar la superficie del suelo con el extremo de la varilla de medición.

4.2.2 Medición de la escorrentía superficial

La escorrentía o escurrimiento superficial, es el flujo de agua sobre la superficie del terreno, cuya capacidad erosiva viene dada por las condiciones edáficas, topográficas, y de cobertura del mismo. Es producto principalmente, de una insuficiente velocidad de penetración del agua lluvia en el perfil edáfico, así, la llegada al suelo de una elevada cantidad de agua en un período corto de tiempo, produce rápidamente escorrentía (León, 2001).

Dentro de los métodos más comúnmente empleados para la medición de la escorrentía superficial, se pueden diferenciar dos categorías: de campo y de laboratorio. Al último grupo no se hace alusión aquí, estando concentrado el desarrollo descriptivo, en aquellos montajes necesarios para estimar las pérdidas de suelo por escurrimiento superficial directamente en campo. Por su parte, dentro de los métodos de campo, pueden ser asimismo diferenciados dos tipos (Moreno, 1994; Calvo *et al.*, 1988): medidas constantes en parcelas permanentes; y medidas puntuales en un gran número de sitios o situaciones, los cuales incluyen múltiples modelos de simuladores de lluvia; es del primer grupo referido que se presentarán algunas de sus variaciones, de diferente utilidad y complejidad, a los efectos de capturar en forma conjunta suelo y agua, los cuales conforman el escurrimiento.

4.2.2.1 Parcelas de escorrentía

Son porciones de terreno de tamaño variable, limitadas por paredes que aíslan completamente el agua de escorrentía, evitando el paso de ésta tanto hacia afuera como hacia adentro de la parcela. El agua que escurre es hacia el final concentrada en un embudo colocado en la base, de donde por medio de un canal pasa a uno o varios tanques donde se recolectan las muestras para el análisis.

¹¹ Traducción al español del término "measuring frames"

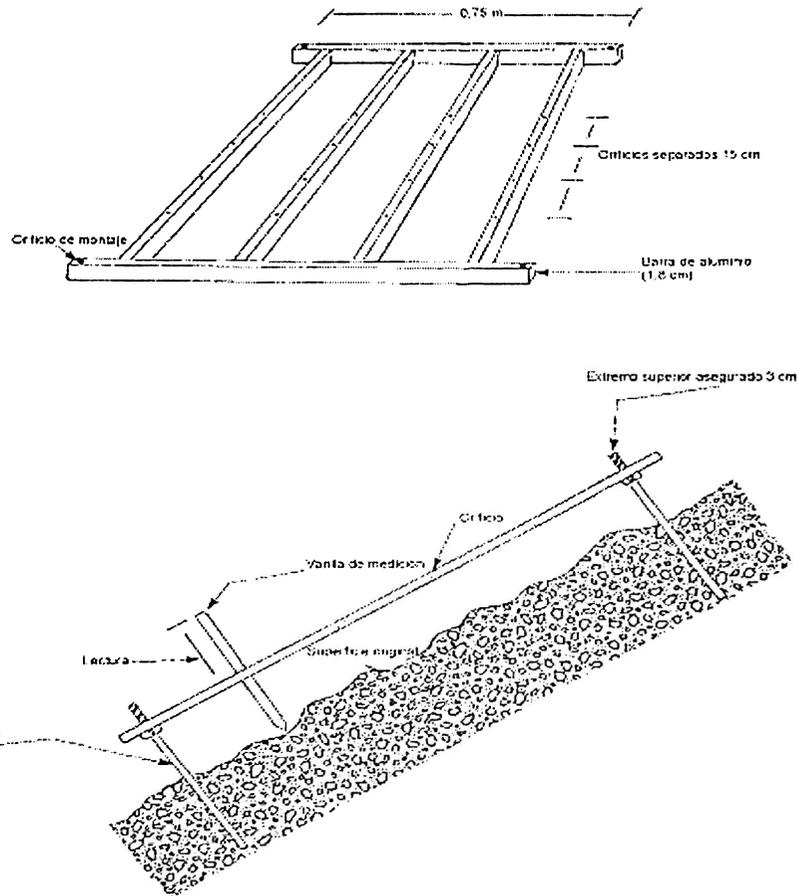


Figura 1.
Marco para medición de la
variación del nivel superficial del
terreno.
Fuente: Adaptado de Lam (1977).

Su tamaño más frecuente es de 44 m² (2x22 m); así, Morgan (1986) indica unas dimensiones de 22 m de largo por 1,8 m de ancho, aunque otros tamaños de parcelas son utilizados, sin embargo se sugiere la adopción de una longitud mínima de 10 m para la evaluación de la escorrentía superficial, pudiendo ser sustancialmente mayor en el caso de evaluaciones relativas a prácticas de conservación y cultivo. A pesar de que hay poca uniformidad acerca del tamaño de las parcelas, para este tipo de experimentos, se reportan longitudes entre 15 y 32 m, y anchos entre 6 y 13 m (Ibid.).

Una consideración de principal importancia en la escogencia del tamaño de parcela, es lograr un balance adecuado entre los efectos de borde en parcelas pequeñas, y las grandes cantidades de escorrentía superficial producidas en parcelas de mayor tamaño (Hornung, 1990). La parcela debe evitar el paso del agua hacia adentro y hacia afuera, para lo cual son establecidos límites con bandas de metal, madera, plástico u otro material, cuya disposición se hace de canto en la tierra; sus bordes deben extenderse cuando menos 150-200 mm por sobre el nivel de la superficie del suelo.

Con el fin de obviar el problema inherente a los altos costos derivados de la captura de la totalidad del agua, hacia el final de las parcelas en tanques de metal o concreto, Geib (1933), trabajó en el diseño de cajas divisorias de la escorrentía que permitieran llevar a cabo la recolección de una alicuota representativa del escurrimiento (De Ploey y Gabriels, 1984). En este sistema, la escorrentía llega a un embudo localizado al final de la parcela, construido de madera, y cubierto con un techo de lata para evitar la entrada de agua lluvia, de donde pasa a los tanques de sedimentación a través de un canal impermeabilizado.

En el tanque de sedimentación se tiene un sistema de filtración para retener basuras y piedras, de donde el agua sigue a las cajas divisorias, a partir de las cuales pasa a un tanque recolector donde se toma la alicuota. El mejor tipo de caja divisoria es el de varias ranuras (5, 9 u 11 rectangulares), las cuales deben ser perfectamente iguales y estar en número impar y a igual distancia, con lo cual se obtiene un error inferior al 2%; el agua que pasa a través del canal central puede ser llevada a otra caja divisoria o al tanque recolector, en tanto que la que pasa por los canales restantes se evacúa.

La determinación de la cantidad de suelo contenido en los tanques variará con su tamaño, así (Hornung, 1990): en tanques de gran capacidad, el volumen de agua más sedimento es registrado inicialmente. El sedimento suspendido es comúnmente floculado, y el agua por encima drenada; el volumen de sedimento más agua remanente es registrado. Una submuestra, de volumen conocido, de sedimento más agua remanente es removida y secada, siendo así empleados el peso resultante y el volumen conocido de sedimento más agua remanente en el tanque, para calcular el peso total colectado.

La parcela de escorrentía ha sido ampliamente empleada para la determinación de pérdidas de suelo en campo, sin embargo, hoy día ha entrado en buena medida en desuso. Si bien se trata del método más fiable para medir la erosión de forma directa (De Ploey y Gabriels, 1984; Morgan, 1986), hay varias fuentes de error involucradas en su empleo, dentro de las cuales cabe destacar (Morgan, 1986): la posible formación de arroyos junto a los laterales colocados, que de otra manera no tendrían lugar; la interrupción del flujo de toda la pendiente por la imposición del límite superior, siendo afectados tanto agua como sedimentos; y el mantenimiento de un nivel constante entre la superficie del suelo y el borde del canal. Además, se tienen desventajas dados sus altos costos - los cuales por su parte representan limitaciones en la representación del ensayo- y por los requerimientos de áreas fisiográficamente uniformes, que impiden por su parte la implementación de un número representativo de replicaciones por tratamiento. Asimismo, dado que es inevitable la generación de algunos disturbios e interferencias durante su construcción, es importante propiciar un período adecuado para la calibración.

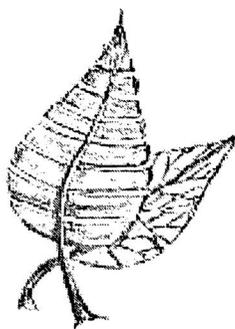
4.2.2.2 Cajas Gerlach

Algunos de los problemas asociados a la utilización de parcelas de escorrentía, son superados mediante el empleo de cajas Gerlach (artesanías Gerlach); dada su simplicidad y bajo costo, pueden usarse a efectos del muestreo de pérdidas de suelo en un gran número de sitios seleccionados en un área extensa, siendo por tanto apropiadas para estudios de erosión a una escala de cuenca hidrográfica (Morgan, 1986). Asimismo, si bien ocurren disturbios durante su instalación, estos son menores que aquellos mencionados para las parcelas delimitadas, adicionalmente, el efecto de borde de estas últimas no se presenta, constituyendo por tanto el objeto de estudio un sistema abierto.

Por contrapartida, su principal problema radica en la necesidad de estimar el área que contribuye al flujo recogido en cada colector, siendo ésta usualmente obtenida del producto entre la anchura del receptor y la longitud de la pendiente, para lo cual se hace indispensable en ocasiones, una limitación superior (Sala, 1988).

Mediante las cajas Gerlach pueden ser recogidos tanto flujo como sedimentos en pendientes, áreas abiertas o superficies delimitadas. En el caso de parcelas abiertas de escorrentía, las mediciones pueden ser tomadas directamente si las líneas de flujo corren en su mayor parte, en sentido paralelo a las líneas de la ladera, y si se tiene una idea de la cantidad de la lluvia recogida con base en la longitud del segmento de la pendiente, que se mide a partir de la división del desagüe (De Ploey y Gabriels, 1984).

Las longitudes de las bandejas mayormente empleadas son de 0,5-1,0 m; se reportan sin embargo tamaños desde 0,1 m (Bovis y Thorn, 1981) hasta 2 m (McGregor, 1980). Para su colocación en campo, el dispositivo se fija al horizonte A de la pendiente por medio de un saliente de metal, protegiéndose de la erosión por dispersión a través de una tapa móvil; el flujo y el sedimento se drenan por medio de mangueras plásticas, a un recipiente enterrado cuesta abajo de la pendiente. Se recomienda (Moreno, 1994) la disposición de una malla plástica de 2 mm de luz al interior de la caja, para la retención de materiales gruesos (Figura 2).



Con las muestras recogidas, pueden ser determinados las pérdidas de suelo en peso y volumen; el volumen de escorrentía; la tasa de infiltración (siempre y cuando se cuente con información pluviográfica); y las pérdidas de elementos minerales tanto vía solución como material particulado.

Los datos provenientes de las bandejas, son usualmente presentados como masa de suelo colectada/masa de suelo erodada, por unidad de ancho de pendiente, en un período de tiempo dado. La pérdida por unidad de ancho es algunas veces convertida a una pérdida por unidad de área asumiendo que la bandeja colecta de un sector de la ladera de igual ancho que el del colector, prolongándolo desde éste en dirección de la pendiente hasta su parte superior. Este supuesto podría justificarse sobre una pendiente uniforme y recta, más no sobre una de carácter más complejo, requiriendo así una determinación más detallada el área de captación respectiva (Hornung, 1990).

Una de las principales limitaciones para el empleo de cajas Gerlach bajo coberturas vegetales, es la aceptación de ocurrencia de un flujo paralelo a las líneas de pendiente, dado que en condiciones de campo, la vegetación y muchos obstáculos sobre la superficie, actúan como freno, y desvían los flujos superficiales de agua, los cuales, a pesar de hacer parte del escurrimiento, no son por tal situación recogidos en los dispositivos. De aquí que tenga lugar una posible supervaloración de los flujos de escorrentía superficial (Soler y Sala, 1992), dado que el agua que fluye por la superficie, generalmente se infiltra al encontrar zonas de depresión en el suelo, o ante obstáculos al flujo (v.g. plantas y rocas). Así, las aguas recogidas en el dispositivo -situado al final de una pendiente homogénea- podrían infiltrarse un poco después, de no ser interrumpidas por la caja: de esta forma se computa como escorrentía superficial una cantidad de agua que en el conjunto de la parcela, podría ser drenada (Moreno, 1994).

A las anteriores consideraciones se suma la dificultad que bajo ciertas condiciones reviste el cálculo del área de recepción de la Caja, ya que éste puede verse afectado como resultado de la estimación de la longitud de la pendiente, la cual es bastante imprecisa cuando se trata de terrenos irregulares en su superficie. En síntesis, algunos de los problemas principales asociados al empleo de este colector, son (Hornung, 1990):

- Número de bandejas necesario
- Colocación de las bandejas sobre el terreno
- Conversión del peso de suelo colectado a un valor de pérdida por unidad de área

Acercas de los dos primeros tópicos enunciados, Roels y Jonkers (1983) proponen un conjunto de lineamientos que orientan el diseño experimental y muestreo respectivo:

- El muestreo al azar y el estratificado al azar, conducen a errores estándar casi idénticos
- El muestreo de grupos de colectores adyacentes, es menos efectivo que los tipos de muestreo recién indicados, cuando se emplea igual número de colectores
- El muestreo sistemático permite obtener muestras precisas a un precio económico

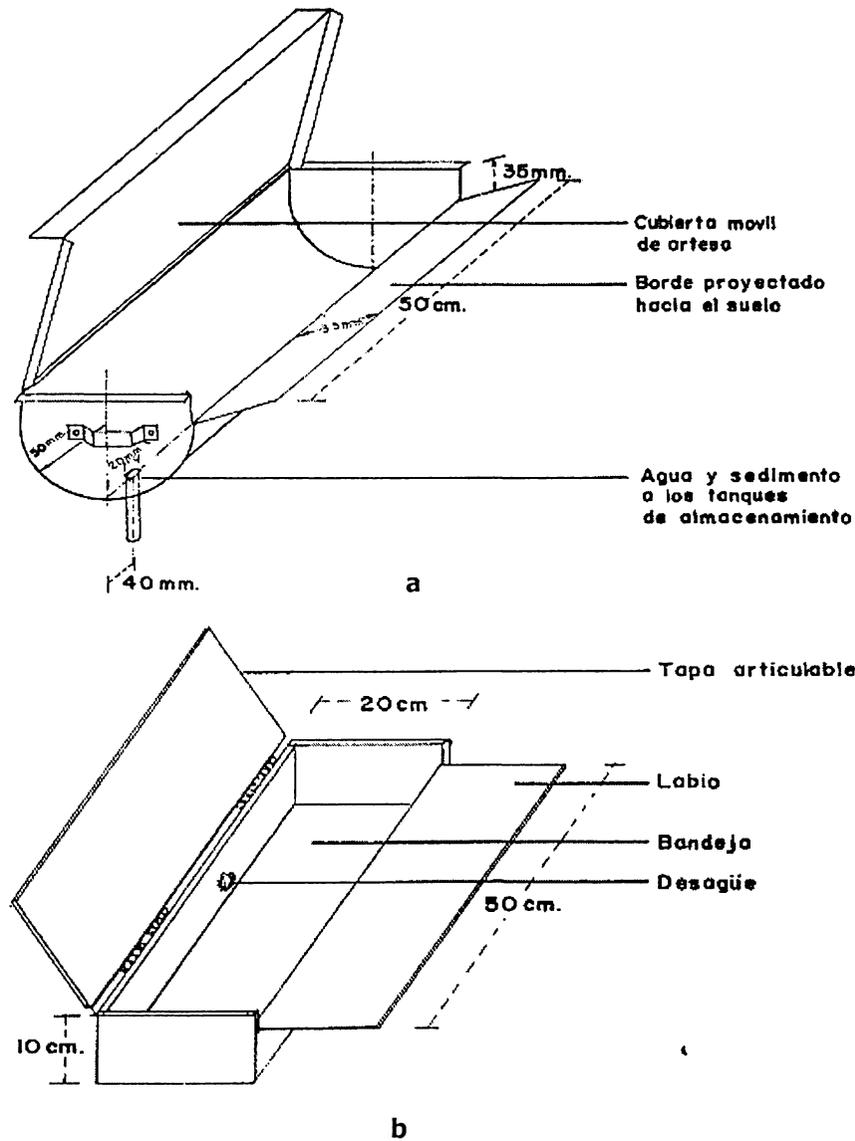
Cajas Gerlach fueron empleadas por McGregor (1980) en la cuenca del río Caquetá, Colombia, para la estimación de las pérdidas de suelo y de la escorrentía superficial, en parcelas experimentales localizadas bajo diferentes coberturas.

4.2.3 Medición de la erosión por salpicadura

La erosión por salpicadura es originada por la caída de las gotas de lluvia sobre el suelo, y es de gran importancia dada su participación dentro del fenómeno de la erosión hídrica en conjunto; así, se estima que el 70% del total de suelo removido, se debe a la acción de la salpicadura. Su impacto está en función de la forma y tamaño de las gotas (erosividad), y de la resistencia del suelo a su poder erosivo (erodabilidad). El efecto de la salpicadura es especialmente dramático en condiciones climáticas tropicales, donde se combinan fuertes precipitaciones y desfavorable



protección del suelo; así, han sido encontradas pérdidas mínimas de suelo por salpicadura (Soyer, 1987) en parcelas localizadas en Zaire, África, cuando la cubierta forestal está presente, alcanzándose valores de 3,1 a 7,2 ton ha⁻¹ año⁻¹, en tanto que bajo cubierta vegetal de maíz, los valores medios de pérdidas son de 188 ton ha⁻¹ año⁻¹.



Las mediciones de la erosión, obtenidas a través de los métodos previamente descritos, permiten la estimación de pérdidas de suelo en una forma combinada, esto es: efecto de la salpicadura y del flujo superficial. Sin embargo, en caso de quererse estimar la contribución aislada del efecto que tiene la salpicadura en el total de pérdidas, o por lo menos, la estimación del desprendimiento, tendrían que ser empleados dispositivos específicos a tales finalidades.

Dentro de tales dispositivos cabe destacarse (Morgan, 1986) el empleo de pequeños embudos o botellas, que son insertados en el suelo, sobresaliendo unos 2 mm por sobre su superficie, a efectos esto último de evitar la entrada del flujo superficial (Figura 3); el material que salpica, y cae luego a su interior, es entonces recolectado y pesado. Estudios de salpicadura con embudos sobre el piso, han sido realizados en condiciones de bosque lluvioso tropical por Soyer (1987), quien resaltaba el poco impacto de ésta en el total de pérdidas de suelo, en comparación con su contribución bajo condiciones de cultivo limpio (maíz), conforme fue ya mencionado.

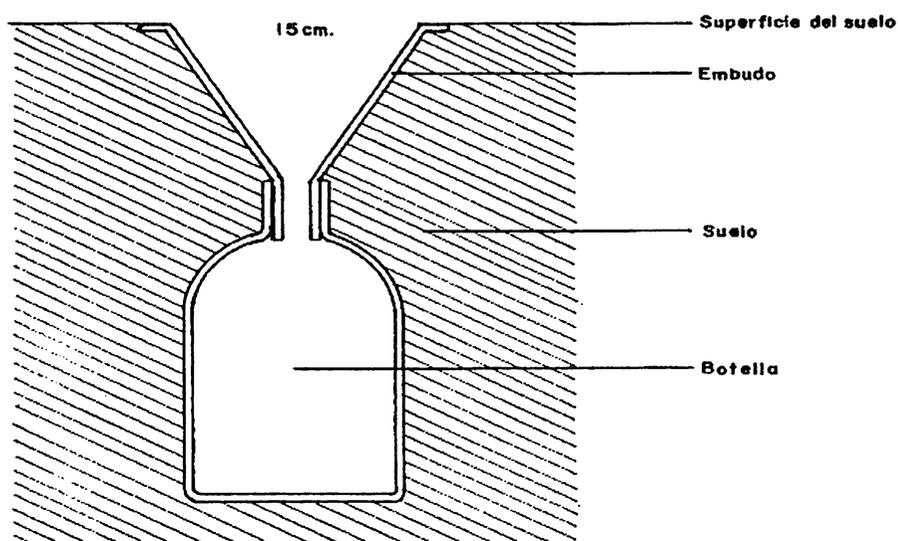


Figura 3.
Medición de la erosión por salpicadura mediante embudos.
Fuente: Adaptado de Morgan (1986).

Un método alternativo para la medición de la salpicadura, se vale de la utilización de la "taza de salpicadura"¹² (Morgan, 1979). Consiste en la separación de un bloque de suelo y su colocación en un cilindro central, de donde el material es removido por concepto de salpicadura, y recogido en una bandeja que rodea el cilindro (Figura 4).

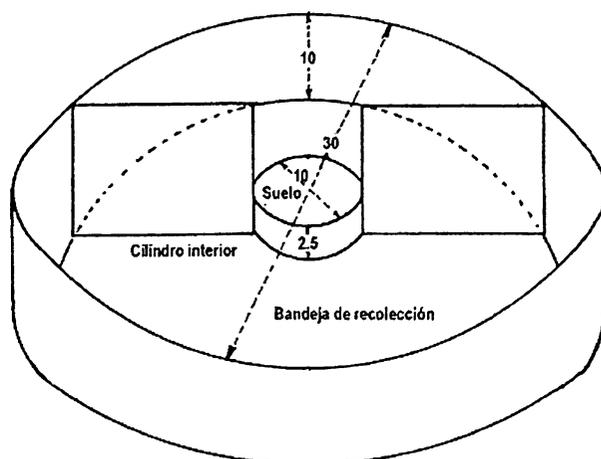


Figura 4.
Medición de la erosión por salpicadura mediante "taza de salpicadura". Fuente: Adaptado de Morgan (1978).

12. Traducción al español del término "splash cup"

4.2.4 Otros tipos de mediciones y estudios de la erosión

Ha sido frecuente la utilización de técnicas no tan formales como las hasta aquí descritas, pero que son de gran utilidad a efectos de evaluar la dinámica de los procesos erosivos, en algunos de sus diferentes aspectos.

4.2.4.1 Transporte de sedimentos

Un método empleado para visualizar el transporte de residuos relativamente grandes en las pendientes, en las cárcavas y en los ríos, consiste en la colocación de rocas pintadas y numeradas a intervalos fijos, de cara al seguimiento del proceso de transporte (De Ploey y Gabriels, 1984). El método –denominado línea de erosión pintada– ha sido usado para medir el transporte de la masa de sedimentos gruesos, para lo cual son trazadas con pintura de esmalte, líneas de 15 a 60 m sobre los materiales sujetos a monitoreo, siendo luego medido su movimiento a partir de tales líneas; el transporte total ha sido calculado como el producto de la distancia cubierta por área de corte transversal, sumado para todas las partículas, y expresado en $\text{cm}^3 \text{cm}^{-1} \text{año}^{-1}$.

De manera similar, Chinen (1987) pintó líneas de sedimentos para evaluar el desplazamiento de materiales por un período de alrededor 20 meses, encontrando que en términos generales, el movimiento hacia abajo de la pendiente, se producía a una tasa de unos pocos metros por año en distancia horizontal. De aquí que se concluyera que en el movimiento del material, es importante la consideración de características del microrelieve y que por tanto, como lo señalaran Young (1974) y Lam (1978) citados por el autor, podría ser un error comparar las tasas de erosión en diferentes sitios, sin tomar en consideración la microtopografía.

4.2.4.2 Métodos radioisotópicos

Dentro de los métodos no tradicionales, se reporta una técnica de gran utilidad para el seguimiento de sedimentos, el marcado radiactivo, dadas sus posibilidades de empleo para el trazado del sedimento enterrado (De Ploey y Gabriels, 1984).

Para la medición de tasas de erosión han sido empleados radioisótopos depositados desde la atmósfera, así como provenientes de adiciones artificiales a la superficie del suelo. El radioisótopo mayormente empleado en estudios de erosión ha sido ^{137}Cs , originado a partir de pruebas nucleares, desde la atmósfera, y depositado sobre la superficie del terreno por la lluvia.

El uso de este radioisótopo en los estudios de erosión, depende de tres hipótesis aceptadas (Hornung, 1990):

- Éste fue depositado de manera relativamente uniforme en el área estudiada
- Una vez depositado, es fuertemente fijado y retenido en suelos con contenidos de minerales de arcilla, especialmente mica y vermiculita
- Luego de la fijación, las pérdidas en solución son despreciables y la redistribución está ligada al movimiento de partículas

El método, si bien ha tenido relativamente amplia utilización especialmente en países desarrollados del hemisferio norte, demanda inversiones económicas altas, dado el equipamiento y personal altamente especializado requeridos.

4.2.4.3 Medición de raíces expuestas

Un método de medición de pérdidas de suelo a través del registro de variaciones en el nivel superficial, empleando elementos naturales, fue aplicado por Dunne (1977) en Kenia, África. Este investigador plantea que los indicadores más generales de disminución superficial en algunas áreas donde ocurre erosión intensa, son las raíces de los árboles o los montículos de suelo residual, protegidos bajo el dosel de árboles o arbustos mientras que el suelo a su alrededor es rebajado. De esta manera, si es posible datar los árboles o arbustos, es decir, estimar su edad mediante el conteo de anillos de crecimiento, la altura del montículo dividida por la edad de la planta, indica la tasa promedio de disminución de la superficie.



De acuerdo con este autor, en contraposición a lo popularmente creído, gran número de especies tropicales pueden efectivamente producir anillos anuales o estacionales de crecimiento. En algunas áreas, el problema de datación se simplifica enormemente cuando se tiene evidencia de que la erosión del suelo se ha acelerado, tras la ocurrencia de un período de intensa liberación o despeje de vegetación.

El método ha sido usado generalmente con especies arbóreas relativamente longevas, y de sistemas radiculares superficiales y aproximadamente horizontales, con anillos anuales de crecimiento en las raíces, bien desarrollados.

Estudiando las especies *Pinus edulis* y *Juniperus osteosperma*, Carrara y Carroll (1979) determinaron la edad de la primera exposición de raíces tomando como base los siguientes criterios:

- El tiempo de comienzo de muerte progresiva del *cambium*
- Interpretación del patrón anual de crecimiento de anillos radiculares
- La más temprana ocurrencia de madera de reacción

Los anillos de crecimiento anuales son formados inicialmente como capas concéntricas, pero una vez ocurre la exposición, la remoción de la corteza exterior y muerte progresiva del *cambium* en la parte superior de la raíz, el crecimiento sólo continúa descendentemente. El crecimiento de las capas formadas después de la muerte del *cambium* son, por tanto, encontradas únicamente en la parte inferior de la raíz (Hornung, 1990).

Para las mediciones en campo, se dispone un "nivel de carpintería" a la altura de referencia –altura supuestamente original de la superficie del terreno- siendo por otra parte medida la altura por encima de la superficie actual con una regla (Figura 5). Dentro de las dificultades del método, la más clara es la determinación de la edad; por otra parte, permite la obtención de tasas aproximadas de descenso de la superficie del suelo, calculadas para períodos de tiempo relativamente largos.

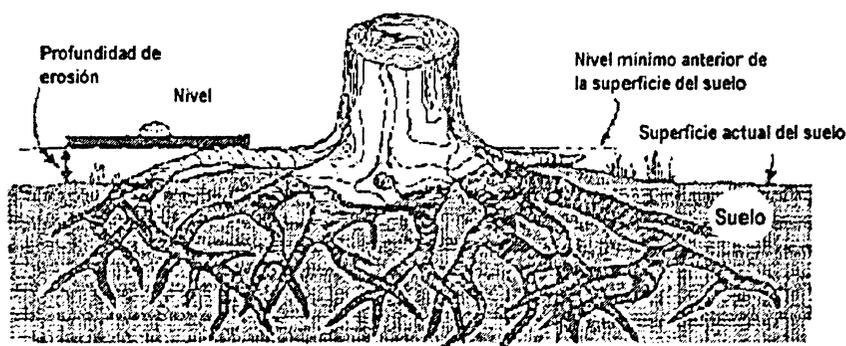
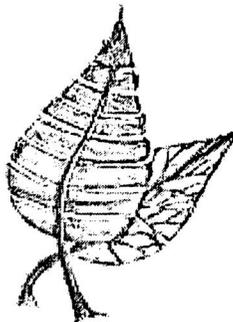


Figura 5.
Medición de tasas de erosión a partir de exposición de raíces.
Fuente: Adaptado de Dunne (1977).

Una de las aplicaciones prácticas de este método, es el levantamiento de cartografía de la variación en la profundidad de erosión a lo largo de una ladera, pudiéndose computar la cantidad total de suelo perdido de una muestra dada, de varias en cada región. Para esto, Dunne (1977) midió a intervalos de 100 m sobre las laderas, la altura de las raíces expuestas o los montículos de erosión debajo de los 5 o 10 árboles o arbustos más cercanos; las mediciones eran hechas en lados opuestos del ejemplar vegetal a lo largo de la curva de nivel, se databa la planta, y se computaba finalmente la tasa promedio de erosión para las plantas en cuestión.



4.2.4.4 Bolsas de malla

Un método novedoso para la estimación de pérdidas de suelo en forma conjunta –salpicadura y escorrentía- es descrito por Hsieh (1992); consiste en el empleo de bolsas de malla de nailon, de un tamaño de 30x30 cm, y ojo de malla de 5 mm por su parte superior, y 2 mm por su parte inferior (fondo), tres de cuyos lados se cosen, quedando únicamente uno abierto. Para su colocación en campo, se remueve toda la vegetación y demás obstáculos donde se van a disponer las bolsas, siendo orientadas éstas con su cara abierta en dirección pendiente arriba. Dentro de sus ventajas frente a los métodos volumétricos (v.g. estacas de erosión) se tienen una mayor precisión y la posibilidad abierta de proveer información acerca de los constituyentes –calidad- de los materiales erosionados.

4.2.4.5 Técnicas aerofotogramétricas

Para el estudio de otras formas de erosión, como los movimientos en masa, De Ploey y Gabriels (1984) exponen varias técnicas para su registro y desarrollo de cartografía, con base en la recolección de información en su estado estático, entre las que citan la utilización de fotografías aéreas y las observaciones de campo; se plantean serias limitaciones que emergen de escalas inferiores a 1:5.000, ya que es más difícil la elaboración de mapas detallados con curvas de nivel, de la topografía de desplazamientos y flujos a intervalos de curva de 0,4 a 0,5 m.

Las técnicas aerofotogramétricas han sido empleadas, además, para determinar el volumen de pérdidas de suelo en los flujos de erosión concentrados, a efectos de lo cual se requiere de fotografías aéreas secuenciales a intervalos críticos, si se trata por ejemplo de estudios en áreas aplicadas a cultivos (Thomas *et al.*, 1986); técnicas fotogramétricas han sido asimismo empleadas para la medición de fenómenos de erosión o deposición a través de series históricas de fotografías aéreas (Dymond y Hicks, 1986), técnica aplicable en condiciones de áreas montañosas donde se registran tasas elevadas de erosión. Adicionalmente, cabe señalar que el método es más indicado para estudios a campo abierto, de gran escala.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

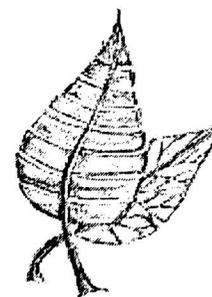
- Las condiciones climáticas imperantes en los trópicos húmedos, en particular la precipitación, y su interacción con los sistemas de apropiación y manejo de la tierra rural, demandan la obtención de conocimiento del proceso de erosión hídrica en superficie, bajo distintas combinaciones de tales variables.
- Dicho conocimiento constituye la base para la formulación de acciones de manejo que viabilicen el desarrollo de actividades productivas de manera sostenida en el tiempo, sin agotar así el recurso suelo. Asimismo, permite planificar procesos de ocupación y apropiación de la tierra sin la generación colateral de efectos deletéreos sobre proyectos de desarrollo (v.g. colmatación de embalses por sedimentos) o sobre la misma sociedad (v.g. contaminación de acueductos por material particulado, verificación de crecientes instantáneas por exceso de carga, etc.).
- Adicionalmente, el estudio del proceso erosivo puede derivar en el desarrollo de modelos que configuran herramientas de gran poder y valor predictivo en ejercicio de la planificación y gestión territorial y ambiental.
- Constituyen consideraciones de importancia crucial en el montaje de estos estudios, entre otras, las siguientes: el diseño experimental y la logística de muestreo adoptados; el diseño de los dispositivos de medición y su acompañamiento con infraestructura apropiada para el registro de variables climáticas (precipitación); la extensión del experimento en el tiempo, previendo como mínimo el cubrimiento de la totalidad del patrón de precipitación anual, etc.
- Una aplicación de gran interés en el caso de terrenos aptos para el desarrollo de actividades productivas, la constituye la cualificación de las pérdidas de suelo en términos de sus nutrientes

asociados. Así, técnicas de gran sencillez como las bolsas de malla descritas -con las limitaciones asimismo para ellas señaladas- posibilitan la obtención de estimativos de pérdidas de suelo no sólo en términos de peso, sino además de su calidad. Se obtienen así ventajas con relación a técnicas basadas en la medición de las variaciones del nivel de la superficie del terreno (v.g. estacas de erosión), siendo para estas últimas destacada su aplicación en el monitoreo de la evolución de procesos de cárcavamiento, movimientos superficiales del terreno, etc.

- Otros métodos empleados en el estudio de la erosión, que permiten la captura no sólo de sedimentos, sino además del flujo de escorrentía (v.g. parcelas de escorrentía), dados sus altos costos y compleja logística de monitoreo, son escasamente implementados en la actualidad. Sin embargo, de su empleo se deriva información de gran utilidad en el marco de la gestión de ciertos proyectos de desarrollo, en los cuales interesa en particular conocer la forma en que diversas maneras de utilización del suelo afectan los procesos de infiltración y escorrentía superficial y las cargas potenciales de sedimentos a ellos asociadas.
- Son muy diversas las gamas de métodos y técnicas existentes para el estudio y monitoreo del fenómeno erosivo. Esto conlleva diferencias importantes, necesariamente, en los costos de implementación y logística de seguimiento. De aquí que, en función de las posibilidades financieras, así como de los resultados que uno u otro método puedan ofrecer, se haga la selección.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bovis, M.J. y Thorn, C.E. 1981., Soil loss variation within a Colorado alpine area. *Earth Surface Processes and Landforms* 6: 151-163
- Calvo, A., Gisbert, J.M., Palau, E. y Romero, M., 1988. Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. *Métodos y Técnicas para la Medición en el Campo de Procesos Geomorfológicos*. Monografía No. 1 (Eds. M. Sala & F. Gallart). Barcelona: S.E.G. 39-40 pp.
- Carrara, P.E. y Carroll, T.R., 1979. The determination of erosion rates from exposed tree roots in the Pineance Basin, Colorado. *Earth Surface Processes and Landforms* 4: 307-318
- Chinen, T. 1987., Hillslope erosion after a forest fire in Etajima island, southwest Japan. *Processus et Mesure de L'érosion* (Eds. A.Godard & A. Rapp). Paris: CNRS. 199-210 pp.
- Colacicco, D., Osborn, T. y Alt, K., 1989. Economic damage from soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation* 44: 35-39
- De Ploey, G. y Gabriels, D., 1984. Medición de la pérdida de suelo y estudios experimentales. *Erosión de Suelos* (Eds. M.J. Kirkby & R.P.C. Morgan). México: Limusa
- Dequi, J., Leidi, Q. y Jiesheng, T., 1981. Soil erosion and conservation in the Wudding river valley, China. *Soil Erosion and its Control* (Ed. R.P.C. Morgan). New York: Van Nostrand Reinhold. 99-117 pp.
- Dunne, T., 1977. Studying patterns of soil erosion in Kenya. *FAO Soils Bulletin* 33: 109-122
- Dymond, J.R. y Hicks, D.L., 1986. Steepland erosion measured from historical aerial photographs. *Journal of Soil and Water Conservation* 41: 252-255
- Gómez F. E., 1996. Parcelas de escorrentía tipo estaca para evaluar la pérdida de suelo. Ponencia VII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Santa Marta, Octubre 2-5, 1996
- Hornung, M., 1990. Measurement of nutrient losses resulting from soil erosion. *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems* (Eds. A.F. Harrison, P. Ineson & O.W. Heal). London & New York: Elsevier Applied Science. 80-102 pp.
- Hsieh, Y., 1992. A mesh-bag method for field assessment of soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation* 41: 249-252
- Hudson, N., 1982. *Conservación del Suelo*. Barcelona: Reverté



- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC)., 1988. Suelos y Bosques de Colombia. Bogotá: IGAC
- Johnson, L.C., 1987. Soil loss tolerance: Fact or myth?. *Journal of Soil and Water Conservation* 42: 155-160
- Lam, K.C. , 1977. Patterns and rates of slope wash on the badlands of Hong Kong. *Earth Surface Processes and Landforms* 2: 319-332
- Leigh, C.H., 1978. Slope hydrology and denudation in the Pasoh forest reserve, 1-Surface wash; experimental techniques and some preliminary results. *Malayan Nature Journal* 30: 179-197
- León, J.D., 2001. Estudio y Control de la Erosión Hídrica. Medellín: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia
- Mc Gregor, D.F.M., 1980. An investigation of soil erosion in the Colombian rain forest zone. *Catena* 7: 265-273
- Moreno M., M., 1994. Balances de Agua y Nutrientes en Rebollares (*Quercus pyrenaica* Willd.) de la Vertiente Salmantina de la Sierra de Gata. Tesis doctoral. Salamanca: Universidad de Salamanca, Facultad de Biología (sin publicar)
- Morgan, R.P.C., 1979. Topics in Applied Geography. Soil Erosion. New York: Longman
- Morgan, R.P.C., 1986. Soil Erosion and Conservation. New York: Longman
- Morgan, R.P.C., Morgan, D.D.V. y Finney, H.J. 1984. A predictive model for the assessment of soil erosion risk. *Journal of Agricultural Engineering Research* 30: 245-253
- Müller, K. y Castillo, J., 1997. Labranza mínima, una tecnología para las laderas de Colombia. *Conservando* 1: 4-6
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)., 2000. Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. Madrid: Mundi-Prensa
- Roels, J.M. y Jonkers, P.J., 1983. Probability sampling techniques for estimating soil erosion. *Soil Science Society of America Journal* 47: 1224-1228
- Sala, M., 1988. Lavado superficial de las vertientes. Métodos y Técnicas para la Medición en el Campo de Procesos Geomorfológicos. Monografía No. 1 (Eds. M. Sala & F. Gallart). Barcelona: S.E.G. 25-30 pp.
- Soler, M. y Sala, M., 1992. Effects of fire of clearing in a Mediterranean *Quercus ilex* woodland: an experimental approach. *Catena* 19: 321-332
- Soyer, J., 1987. Erosion par le splash en région tropicale humide (Lugumbashi, Shaba, Zaïre). *Processus et Mesure de L'érosion* (Eds. A. Godard & A. Rapp). Paris: CNRS. 477-482 pp.
- Temple, P., 1972. Measurements of runoff and soil erosion at an erosion plot scale with particular reference to Tanzania. *Geografiska Annaler* 54-A: 203-220
- Thomas, A.W., Welch, R. y Jordan, T.R., 1986. Quantifying concentrated-flow erosion on cropland with aerial photogrammetry. *Journal of Soil and Water Conservation* 41: 249-252
- Tosi O., J.A., 1972. Una Clasificación y Metodología para la Determinación y Levantamiento de Mapas de la Capacidad de Uso Mayor de la Tierra. San José de Costa Rica: Centro Científico Tropical
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. Washington: USDA

