

anales

ANALES - REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA

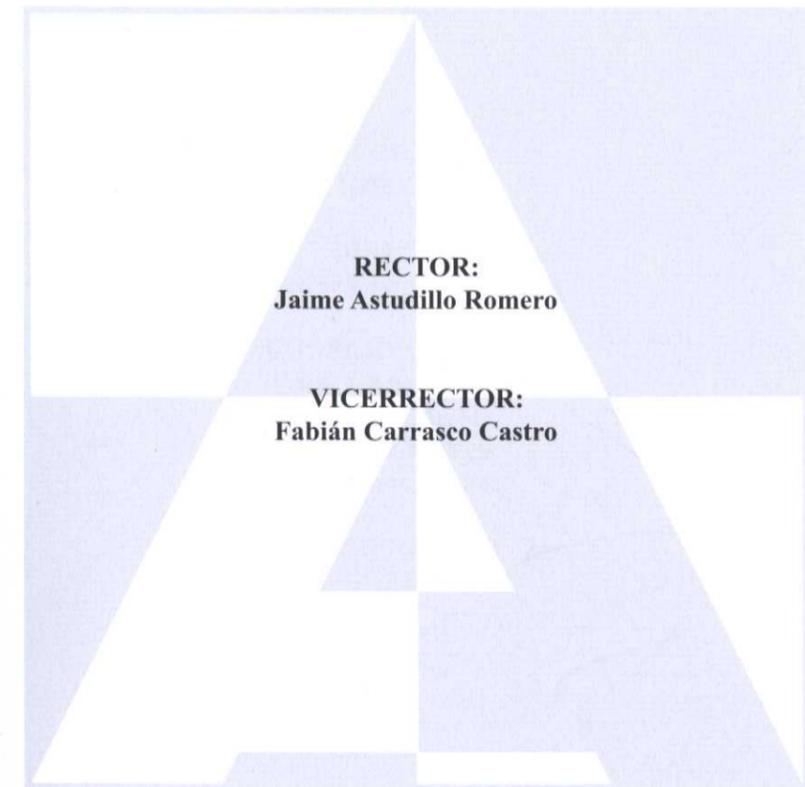
POLÍTICAS BASADAS EN EVIDENCIA CIENTÍFICA PARA EL CONTROL INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS FORESTADAS EN EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN Y DESHIELO

M A N E J O D E L A G U A Y D E L S U E L O

M A N E J O D E L A G U A Y D E L S U E L O

TOMO 55 • DICIEMBRE 2009

515490



RECTOR:
Jaime Astudillo Romero

VICERRECTOR:
Fabián Carrasco Castro

donación \$1.000 / 6-V-2011



●●●●●●●●●●
TOMO 55 - DICIEMBRE 2009



© ANALES - REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA
CIENCIAS NATURALES - TOMO 55

Primera Edición
Diciembre 2009

Departamento de Cultura
Universidad de Cuenca
Casilla No 168
Cuenca Ecuador

E-mail: cultura@ucuenca.edu.ec

CONTENIDO



9. **Editorial**
James Bathurst
11. **Obituario Ian Rainy Calder (1945-2009)**
James Bathurst
13. **La Interrelación del Bosque y el Agua en la Cuenca Hidrográfica**
Juan Ángel Minteguí Aguirre, José Carlos Robredo Sánchez
33. **Medición del Transporte de Sedimentos y Curvas de Descarga de Sedimentos**
James Bathurst
49. **Adecuación de las Actuaciones de R. H-F en Cuencas de Diferentes Ámbitos Geográficos**
Juan Ángel Minteguí, Miriam Miranda, José Carlos Robredo, Jorge Fallas, César López-Leiva, Carmen Valverde, Juan Ignacio García-Viñas
57. **Importancia y Gestión del Material Leñoso en los Cauces**
Luca Mao, Francesco Comiti, Andrea Andreoli, Mario A. Lenzi
65. **Efecto de la Cobertura Vegetal en la Respuesta Hidrológica de Cuencas Hidrográficas**
Cristian Coello, Felipe Cisneros, Jan Feyen
71. **Análisis de Curvas de Duración General para Determinar el Nivel de Degradación de Cuencas**
Felipe Cisneros, Cristian Coello, y Jan Feyen
77. **Variabilidad Espacio-Temporal de la Producción de Sedimento en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute**
Esteban Pacheco, Felipe Cisneros, Diego Mora, Bert De Bièvre, Gerard Govers
83. **Reconstrucción de Eventos Hidrológicos Extremos Utilizando Herramientas de Modelación: Caso Río Chanchán, Fenómeno Del Niño 1982-1983, Ecuador**
Cristian Coello, Andrés Alvarado, Felipe Cisneros,
91. **Caracterización de los Deslizamientos de Tierra de Gran Magnitud en la Cuenca del Río Chanchán**
Juan P. Sánchez, Felipe Cisneros, Jaime Bojorque, Héctor. Ayón
99. **Analysis of the Impact of the Scale and Quality of Catchment Information on The Predictability of the Swat Semi-Distributed Hydrological Model**
Patricio Crespo, Felipe Cisneros, Paul Torres, Jan Feyen
107. **Medición y Análisis de la Variabilidad Espacial de la Precipitación en Microcuencas de Montaña**
Paul Torres, Felipe Cisneros, Patricio Crespo, Bert De Bièvre, Jan Feyen

EQUIPO EPIC FORCE

UNIVERSITY OF NEWCASTLE UPON TYNE (UK, Coordinador)
James Bathurst, Jaime Amézaga.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (ESPAÑA)
Juan Ángel Mintegui Aguirre, José Carlos Robredo Sánchez.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA (ITALIA)
Mario A. Lenzi, Francesco Comiti, Andrea Andreoli.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA (COSTA RICA)
Miriam Miranda, Jorge Fallas.



UNIVERSIDAD DE CUENCA (ECUADOR)
Felipe Cisneros, Cristian Coello, Pedro Cisneros, Bert De Brièvre.



SUBSECRETARIA DE RECURSOS NATURALES
DE TIERRA DE FUEGO (ARGENTINA)
Adriana Urciuolo, Rodolfo Iturraspe, Leonardo Collado.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA (ARGENTINA)
Marcelo Gaviño, Ramiro Sarandón, Verónica Guerrero Borges.



UNIVERSIDAD AUSTRAL (CHILE)
Andrés Iroume, Anton Huber, Jorge Gayoso, Silvana Gayoso.

**EDITORIAL**

La actividad humana ha generado cambios profundos en el uso de la tierra a nivel mundial en el siglo pasado, especialmente a través de la deforestación. Los impactos hidrológicos de estos cambios, por ejemplo a nivel de caudales fluviales en períodos de precipitaciones intensas y a lo largo del año, son motivo de preocupación y han atraído el interés de la investigación. La interpretación pública de estos impactos ha tendido a divergir, a veces de forma importante, del conocimiento científico existente. De este modo, la deforestación y la tala son consideradas por la opinión pública y los medios de comunicación como actividades que favorecen la ocurrencia de efectos desastrosos como las inundaciones, generadas por precipitaciones extremas o huracanes. Las políticas gubernamentales y de las agencias de desarrollo de recursos hídricos tienden a tener esta visión; consecuentemente, destinan grandes inversiones monetarias a la reforestación las áreas de las cuencas hidrográficas en las que se sitúan las fuentes hídricas, y al control del uso del suelo en poblaciones (normalmente pobres) que viven en estas áreas, con el argumento de que los bosques reducen la incidencia de inundaciones. En cualquier caso, existen pocas bases objetivas para emprender estas acciones. El impacto de la gestión forestal en la respuesta de las cuencas hídricas a los eventos de precipitación extrema es un área que cuenta con escasa certeza científica y que ha generado políticas pobremente concebidas. En particular, mientras los bosques pueden reducir las inundaciones generadas por tormentas de baja intensidad, existe evidencia de que este efecto se reduce a medida que la intensidad de precipitación aumenta. El Proyecto EPIC FORCE (Políticas para el Control Integrado de los Sumideros de Ríos Reforestados en Eventos de Precipitación y Deshielo Extremos, basadas en la Evidencia, por sus siglas en inglés), financiado por la Comisión Europea durante el período 2005-8 (<http://www.ceg.ncl.ac.uk/epicforce>), fue impulsado para examinar el impacto de la gestión forestal en las respuestas de las cuencas hídricas a episodios extremos de precipitación y deshielo, en el ámbito latinoamericano. Su objetivo fue el desarrollar recomendaciones políticas de base científica para el manejo integrado de bosques y recursos hídricos, a través de mejoras en el conocimiento de los efectos del uso del suelo en la respuesta de las cuencas hídricas a eventos extremos de precipitación y deshielo, y de la creación de un marco de desarrollo de estrategias de gestión.

Un aspecto importante del proyecto fue su focalización en Latinoamérica, que no había sido considerada anteriormente en investigaciones anteriores de impactos forestales para eventos extremos. Las áreas estudiadas se situaron en Costa Rica, Ecuador, Chile y Argentina. Estas contenían bosques tropicales y templados sujetos a eventos extremos de precipitación, desde huracanes hasta eventos relacionados con la corriente el Niño, con borrascas originadas en latitudes medias o con la escorrenría generada por la fundición de glaciares. Además, estos países presentan graves problemas de inundaciones y de erosión, sufren procesos de rápida conversión de sus bosques, presentan actividades forestales extensivas y carecen de políticas integradas y consistentes de manejo de recursos hídricos y forestales.

El Proyecto EPIC FORCE puso especial énfasis en demostrar las conexiones existentes entre el manejo forestal y la acumulación de agua y sedimentos en represas de ríos, y la importancia del desarrollo de planes y políticas de manejo integrado. El proyecto generó resultados alcanzados y utilizó tecnologías con el fin de mejorar la eficiencia de los procesos de toma de decisiones, asegurar la sustentabilidad de los recursos hídricos y forestales, apoyar la lucha contra la pobreza, fortalecer las capacidades institucionales y contribuir al desarrollo de modelos estandarizados. Dado el valor económico cada vez mayor de las predicciones hidrológicas, es esencial que las organizaciones que participan en los procesos de toma de decisiones tengan acceso a proveedores de información actualizada y precisa. En los cuatro países estudiados, las agencias nacionales de desarrollo forestal y de manejo de recursos hídricos mostraron un gran interés en el proyecto y fueron los principales receptores de los productos obtenidos en cuanto a políticas y propuestas de gestión.

En el Ecuador el proyecto generó dos oportunidades particulares. En primer lugar, a través de la decidida participación del representante ecuatoriano, la Universidad de Cuenca, se establecieron diferentes espacios de estudio en la cuenca del río Chanchán, permitiendo el estudio de una amplia gama de factores relativos a la gestión urgente del suelo. Estos se refirieron especialmente a la conservación del ecosistema único del páramo. La comparación de las respuestas a la inundación en pares de micro-represas con usos de suelo diferentes permitió generar evidencias para apoyar la hipótesis central del proyecto, en cuanto a que a medida que la intensidad de la inundación crece, los efectos del uso del suelo son menos importantes. En segundo lugar, el proyecto coincidió con la revisión de la Constitución Nacional, por lo que se presentó la oportunidad de influenciar el establecimiento de políticas. De este modo, se sugirieron propuestas políticas concretas a las mesas de trabajo de la Asamblea constituyente. Estas propuestas se refirieron a los siguientes aspectos: (1) la necesidad de utilizar mejor evidencia científica para el desarrollo de políticas referentes a eventos extremos; (2) protección contra deslaves generados por eventos extremos; (3) protección de los suelos de páramo; (4) protección de bosques nativos en represas de fuentes hídricas. Las propuestas fueron presentadas directamente a los generadores de políticas en Quito, enfatizando el rol de la investigación en la elaboración de políticas basadas en la evidencia para el manejo de represas andinas sobreexplotadas sujetas al fenómeno del El Niño y a episodios frecuentes de deslaves.

La divulgación fue un componente esencial del proyecto; los resultados alcanzados y las tecnologías utilizadas fueron dadas a conocer a través de la implementación de talleres nacionales, conferencias internacionales, publicaciones científicas, entrevistas con diferentes actores, conferencias de prensa y el sitio web del proyecto. Como Coordinador del Proyecto, felicito la publicación de esta colección de artículos, publicados en ANALES. La conjunción de los diversos artículos en una misma publicación permite mostrar los logros del proyecto en la mejora de los procesos de toma de decisiones políticas basadas en resultados científicos, en el desarrollo de guías para el manejo integrado de recursos forestales e hídricos y en la transferencia de los resultados de la investigación a los procesos de elaboración de políticas.

El proyecto EPIC FORCE fue liderado por la University of Newcastle, Reino Unido. Otros partners del proyecto fueron la Università degli Studi di Padova, Italia, la Universidad Politécnica de Madrid, España, la Fundación Universidad Nacional de Costa Rica, la Universidad de Cuenca, Ecuador, la Universidad Austral de Chile, la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, y la Secretaría de Desarrollo sustentable y Ambiente de Tierra del Fuego, Argentina.

Dr. James Bathurst
Project Coordinator
Newcastle University, UK

Obituario

Ian Rainy Calder (1945-2009)

Eminente investigador cuya incesante actividad brindó
invaluables aportes a la ciencia de la hidrología.

Ian era un científico reconocido y admirado quien expandió nuestra comprensión de la hidrología forestal en gran medida y quien aplicó su experticia al manejo integrado de los usos de la tierra y de los recursos hídricos y al desarrollo ultramar de asuntos de hidrología.

Se graduó en Física Especial en la Universidad de Leeds (University of Leeds) en 1958 y misma universidad en la que completó el PhD en la Física de la Radiación Cósmica en 1971. Luego de un breve periodo como consultor en investigación de operaciones sobre sistemas de control científicos (SCICON), redirigió sus talentos en física hacia la hidrología, uniéndose, en 1972, a la sección de Física de Suelo en el Instituto de Hidrología (Institute of Hydrology, IH) (ahora el Centro de Ecología y Hidrología, Wallingford). Desarrolló rápidamente experticia en combinar experimentos de campo meticulosamente diseñados usando técnicas de medición novedosas, con modelización de procesos físicos. Instigó un lisímetro natural a Plynlimon, siguiendo la guía temprana de Frank Law en el reservorio de Stocks como también la del director del IH, Jim McCulloch, en África del Este. Suplementó las lecturas del lisímetro usando la sonda de neutrones relativamente nueva del IH para medir cambios en el contenido de agua en el suelo y diseño dispositivos laminares para determinar la precipitación neto debajo del dosel forestal. Combinando estas mediciones con la aplicación del modelo de balance de agua en la canopea de Rutter y los resultados de experimentos complementarios sobre la fisiología de los árboles y los flujos de vapor de agua en pastos de parte de John Roberts en sus últimos años, también de parte del IH, fue capaz de demostrar de manera convincente la existencia de la interceptación, mecanismo a través del cual los bosques puedan usar más agua que los pastos. Un modelo generalizado de uso del agua en el bosque fue desarrollado (conjuntamente con Malcolm Newson) para su uso a través de Bretaña. Un momento muy excitante, casi una década después, vino cuando Ian, Peter Walsh y Malcolm Newson subieron a un ático en el Reservorio de Stocks a descubrir todos los datos inéditos de lisimetría y en cuencas hidrográficas, cuales subsecuentemente anotaron como una confirmación independiente de los hallazgos de Plynlimon. Promovido (en 1976) a encabezar la sección de interacciones de procesos del IH, Ian lideró estudios adicionales sobre la hidrología forestal en las cuencas hidrográficas de Plynlimon y Balquhidder, donde sus habilidades para aplicar nuevas técnicas llevaron a la implementación exitosa de la atenuación de los rayos gamma para la medición de interceptación de nieve en la canopea forestal.

En 1986 fue solicitado de parte del IH a ser el director ejecutivo de recursos hídricos en Malawi, un puesto que mantuvo por tres años. Su asignación fomentó su preocupación por los recursos hídricos en países en desarrollo y, a su regreso al IH, llevó a su asignación en 1989 como asesor en hidrología de la Administración para el Desarrollo Ultramar (Overseas Development Administration, ODA) del gobierno del Reino Unido (ahora el Departamento para Desarrollo Internacional, Department for International Development, DfID). Como asesor condujo la ODA hacia el reconocimiento de la importancia del agua en muchos países en desarrollo y de las interacciones sutiles entre el manejo de recursos de tierra y agua. Durante su periodo lideró un gran proyecto multidisciplinario investigando el uso de agua en plantaciones de eucalipto en la India y, como parte de esto, desarrolló la técnica de determinación de las trazas de deuterio para medir el uso de agua (transpiración) en árboles individuales. Subsecuentemente (desde 1993), como jefe de la División de Hidrología Experimental del IH, expandió la reputación ya considerable del IH en el impacto de las plantaciones forestales a través del mundo.

En 1998, siguió su trayecto en búsqueda del norte hacia el título de Profesor, destinado a ex-personal del IH, camino que abierto por Enda O'Connell, Malcolm Newson y Keith Beven, juntándose con los dos anteriores en la universidad de Newcastle (Newcastle University) para convertirse en profesor en Manejo de los Usos de la tierra y de los Recursos Hídricos y Director del Centro para Investigación en el Uso de la Tierra y Recursos Hídricos (CLUWRR). CLUWRR era inicialmente una organización paraguas para integrar las actividades de investigación de los departamentos de Ingeniería Civil, Geografía e Ingeniería Agrícola. Bajo el liderazgo de Ian, sin embargo, el Centro desarrolló experticia particular en el manejo integrado de tierra y agua y asuntos de desarrollo ultramar. Notablemente, CLUWRR fue comisionado por el Programa de Investigación Forestal del DFID para establecer una unidad para coordinar un conjunto de proyectos enfocados en los impactos de los bosques sobre la oferta y la calidad de agua. Esto incluye proyectos en África del Sur, Tanzania, Granada, India y Costa Rica. Otros proyectos adicionales son: el impacto de la reforestación de la cuenca hidrográfica de canal sobre el Canal de Panamá; los impactos sobre el recurso agua, la sociedad, la biodiversidad y la fijación de carbono de plantaciones de biocombustibles; y el uso de agua de diferentes especies forestales en Europa bajo condiciones climatológicas actuales y futuras. Ian también continuó sus contribuciones científicas, especialmente a la modelización de la interceptación, a través del desarrollo de un modelo estocástico innovador de la pérdida de interceptación y la extensiva aplicación de su modelo HYLUC al balance de agua a nivel de la cuenca hidrográfica y a la problemática de los recursos hídricos. Ian no solía esquivar la controversia donde él estaba convencido que la ciencia contradecía las percepciones populares, y fue un fuerte promotor de las políticas basadas en evidencia. Ya que países desde China hasta América Central debían las inundaciones a la deforestación, Ian lideró un debate internacional, poniendo en énfasis que la atribución de los impactos mayores de inundación a la deforestación no era sostenida por la evidencia.

Ian no solo era un excelente científico, además tenía facilidad para desarrollar relaciones con las organizaciones mayores de financiamiento y gestión para el manejo de los recursos tierra y agua, incluyendo el Banco Mundial, la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, DFID y agencias correspondientes en todos los continentes. Ha sido Líder del Grupo de Trabajo Internacional para Interacciones entre Bosque y Agua en la Unión Internacional para Organización de Investigación Forestal (IUFRO). Ha viajado ampliamente por su trabajo, especialmente a India, Malawi, África del Sur, Panamá, Costa Rica, Indonesia, China, Noruega, Zimbabue, Tanzania, Sri Lanka, Nueva Zelanda y Vietnam, y por supuesto dentro del Reino Unido. A pesar de la reputación considerable dentro del Reino Unido, era quizá aun más conocido afuera, con frecuencia solicitado para presentar charlas en conferencias internacionales mayores en una variedad de puntos de reunión. Al anunciarse su fallecimiento, mensajes de condolencia fueron recibidos desde alrededor del mundo, elogiando sus cualidades personales tanto como su clase científico.

Ian realizó extensivamente publicaciones. Será recordado particularmente por sus libros "Evaporation in the Uplands" (1990), el cual distilo mucho de su experiencia en Wales y Escocia y "The Blue Revolution" (1999, 2005), cual discutía el manejo integrado del uso del suelo y los recursos hídricos, basándose en su amplia experiencia internacional, y examinando críticamente la base para algunas percepciones equivocadas en cuanto a los efectos hidrológicos de los bosques. Era Editor gerencial del "Journal of Hydrology" y de "Tree Physiology". Fue Profesor Invitado en las universidades de Loughborough y Birkbeck.

Ian era jovial y lleno de inspiración en sus viajes. En su último viaje a Plynlimon, saliendo de un bar después de la hora de cierre, encontrando las puertas de Lloyed's Hotel (guarida de los hidrólogos en Llanidloes donde estuvo hospedado) cerradas, él y sus compañeros de trabajo de campo "tomaron prestada" una escalera de un campo de obra cercano para entrar por la ventana de atrás! Luego, en el transcurso de sus vuelos a India, desarrolló la capacidad legendaria de coleccionar los bocaditos de la aerolínea, usualmente desembarcando con una reserva de jarritas de tónica para acompañar su botella de gin adquirida localmente.

Luego de una larga dolencia, llevada con tremenda fuerza, Ian sucumbió a causa de la enfermedad de neurona motora, en Mayo 2009. Continuó su trabajo en sus proyectos hasta sus últimos días, comunicándose por email cuando su voz fallaba. Es sobrevivido por su esposa, Val y sus hijas, Fiona e Isabel.

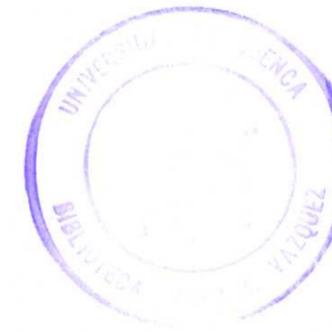
James Bathurst, Jaime Amezaga, Richard Harding, Jennifer Harrison, Andy Large, Jim McCulloch, Malcolm Newson, Enda O'Connell, Mark Robinson.

Dr. James Bathurst
Project Coordinator
Newcastle University, UK

La Interrelación del Bosque y el Agua en la Cuenca Hidrográfica

J. Á. Mintegui & J. Robredo

Universidad Politécnica de Madrid;
E. T. S. Ingenieros de Montes,
Departamento de Ingeniería Forestal;
Unidad de Hidráulica e Hidrología.
Madrid (España)



RESUMEN

Se analiza la incidencia de las masas arboladas en el comportamiento de los ciclos del agua y de los sedimentos dentro de una cuenca hidrográfica; diferenciando los cortos pero intensos intervalos en los que transcurren los eventos torrenciales, de los largos periodos que discurren entre eventos torrenciales consecutivos. Durante los primeros el bosque amortigua los efectos geo-torrenciales que se desencadenan en la cuenca. En los periodos restantes las masas arboladas continúan incidiendo en el régimen hidrológico de la cuenca a través de los procesos transpiración, interceptación y condensación; pero también constituyen la vegetación climática o pseudoclimática, asegurando de este modo la estabilidad biológica y la capacidad de regeneración de los ecosistemas de la cuenca, un aspecto esencial en el esquema restaurador de cuencas degradadas mediante repoblaciones forestales de carácter protector. Asimismo se analizan otros usos del suelo alternativos al arbolado para diferentes zonas de la cuenca vertiente, compatibles con su conservación y aprovechamiento sustentable. Ante la utilización del bosque en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente es preciso contemplar tres aspectos: 1) La protección de la cuenca de los efectos que los eventos torrenciales puedan causarla. 2) Las necesidades hídricas de la vegetación arbolada. 3) La conservación del ecosistema en un estado tal, que sea posible la recuperación de su vegetación hacia estados superiores de su evolución climática. La estructura del documento se ciñe a los fundamentos físicos y a los principios lógico-analíticos que regulan los procesos estudiados; complementándose con los resultados de algunas de las investigaciones más señaladas relativas a su contenido, que contribuyen a corroborar las conclusiones presentadas.



1. EL BOSQUE EN EL CICLO DEL AGUA

Es evidente que los recursos hídricos se localizan dentro del ciclo del agua y resulta demostrable que el bosque, entendido como suelo forestal y cobertura arbolada, incide en dicho ciclo; pues condiciona el movimiento del agua dentro de la cuenca vertiente, regulando su velocidad de escorrentía e incrementando su infiltración en el suelo, luego interviene en lo que se puede definir como la componente horizontal del ciclo del agua.

A ello hay que añadir la transpiración de la masa arbolada del bosque, que impulsa una cierta cantidad de agua (en ocasiones elevada) hacia la atmósfera, cerrando de este modo la componente vertical de dicho ciclo en la cuenca, que se inicia con las precipitaciones. Queda por aducir que también sobre estas últimas interviene el bosque: por un lado, interceptándolas con su cubierta aérea cuando se trata de precipitaciones verticales; por otro, cediendo la misma para facilitar en ella la formación de precipitaciones horizontales, principalmente condensaciones y la formación de nieblas (Figura 1).

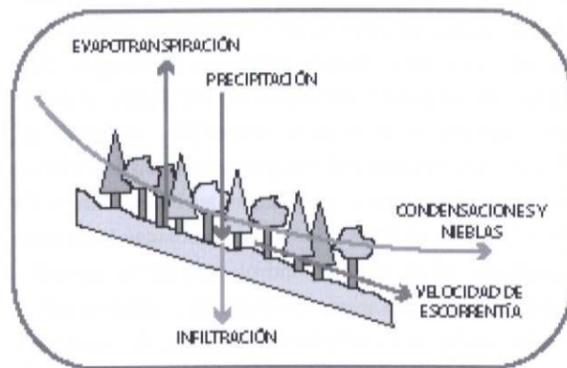


Figura 1. Incidencia del bosque en el ciclo del agua

De acuerdo con lo expuesto, la gestión forestal, que es el instrumento que maneja el bosque a lo largo del tiempo, interviene en el ciclo del agua y en consecuencia incide:

- En la dinámica del agua en la cuenca vertiente, especialmente cuando los aguaceros que acontecen en ésta, causan fenómenos geo-torrenciales en la misma.
- Sobre los recursos hídricos.

Dicha incidencia es muy diferente según se trate del periodo en el que tiene lugar el evento torrencial o la fusión repentina del manto de nieve en la cuenca (que no suele superar los tres o cuatro días, siendo normalmente más corto), que en el largo periodo que transcurre entre dos eventos torrenciales consecutivos. Por tanto, ante la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente, cabe plantear las siguientes preguntas:

- ¿Influyen las superficies de bosque en el origen de las precipitaciones?, dicho de otro modo, ¿Pueden

las grandes superficies arboladas modificar el microclima de una región?

- ¿Interviene el bosque en la dinámica de la formación de las avenidas?; ¿En qué medida puede contribuir el bosque a amortiguar las inundaciones?
- ¿Qué efectos ocasiona el bosque en el control de los procesos geo-torrenciales que se desencadenan en la cuenca vertiente, por causa de los eventos torrenciales o por la repentina fusión del manto de nieve que tienen lugar en ella?
- ¿Cuál es la repercusión de las cubiertas arboladas en las disponibilidades hídricas de la cuenca vertiente en los periodos que transcurren entre eventos torrenciales consecutivos?
- ¿Qué cuestiones se deben plantear en las repoblaciones que se efectúan en las cuencas hidrográficas, con la finalidad de protegerlas de los efectos del fenómeno del geo-dinamismo torrencial que pueden causarles los aguaceros?

Antes de responder a dichas preguntas, se estima oportuno enumerar determinados aspectos intrínsecos, tanto del agua como del bosque, de los que no se puede prescindir en un análisis serio de sus interrelaciones:

- El agua como elemento cumple con la ecuación de continuidad (conservación de la masa) y en la práctica no se puede entender el ciclo del agua de un modo atemporal, sino ligado al periodo concreto que se analiza, que puede ser tanto húmedo como seco. Además, en su recorrido por la cuenca vertiente el agua cumple también con la ecuación de la dinámica (verifica la ley de la conservación de la cantidad de movimiento y la ley de conservación de la energía).
- El bosque es un elemento vivo, que existe de forma natural y estable únicamente donde se dan las condiciones climáticas y edáficas que le permiten instalarse, adquiriendo en función de ellas un tipo específico de formación (sea de coníferas, de frondosas o mixto), que trata de alcanzar la vegetación climática. Ésta se puede considerar como la que mejor aprovecha la energía que le proporciona la naturaleza para ubicarse en dicho lugar. Tiende por tanto a un equilibrio, o pseudo-equilibrio cuando no se alcanza aquel; cuya alteración supone una liberación de energía, que puede causar una modificación de las condiciones medioambientales, que no siempre resulta reversible, o al menos a corto plazo.

Todas las preguntas anteriormente formuladas, salvo la primera, están orientadas a la utilización del bosque ante situaciones espacio temporales concretas, que se asocian con las necesidades de la población que habita en la cuenca para las mismas situaciones, es decir, con la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente; cuyos objetivos y contenidos sobrepasan de la mera dinámica del ciclo del agua en la cuenca; aunque en este documento se intentará ajustar al significado físico de dichas preguntas.

2. LA INTERRELACIÓN CLIMA BOSQUE

Se trata de responder a la siguiente pregunta:

¿Contribuye el bosque a incrementar las precipitaciones? o, dicho de otro modo, ¿Pueden las grandes superficies arboladas modificar el microclima de una región?

Diferenciando las precipitaciones entre verticales y horizontales. Las precipitaciones verticales se clasifican por su origen en ciclónicas, convectivas y orográficas. No parece razonable que los bosques influyan en las precipitaciones ciclónicas. Algunos investigadores han interpretado que los bosques pueden contribuir a incrementar las precipitaciones convectivas, dado que emiten importantes cantidades de agua a la atmósfera por transpiración; pero, como señaló

Penman, para que tengan lugar las precipitaciones no es suficiente con la existencia de una masa de agua en la atmósfera, sino que también se deben dar las condiciones propicias para su condensación (Symposium sobre Hidrología Forestal de la Universidad de Pennsylvania, 1965), por lo que la influencia del bosque en este tipo de precipitaciones resulta en cualquier caso condicionada a situaciones específicas locales. En cuanto a las precipitaciones orográficas, los bosques pueden incidir de dos maneras: a) aumentando la altura efectiva y en consecuencia los desniveles que han de remontar los vientos cargados de humedad, b) por el efecto de fricción que ejercen sobre la velocidad del viento húmedo, este último efecto también se produce en los bosques de llanura; por lo que para algunos científicos como Pavari (1941) o Kittredge (1948) el bosque puede incrementar las precipitaciones orográficas hasta un máximo del 3 %.

Parece más evidente que el bosque influya en las precipitaciones ocultas, que consisten en la fijación en el interior del suelo de vapor de aire atmosférico, cuando la temperatura del suelo está más baja que la temperatura del aire (Shirokih, citado por Molchanov, 1960); o que favorezca las condensaciones debidas a rocíos y escarchas, que suponen también un incremento de agua en el suelo; pero estos efectos, salvo para determinadas situaciones locales, presentan en general escasa relevancia.

Los únicos bosques que tienen una influencia decisiva en el incremento recursos hídricos de la cuenca vertiente, son los conocidos como bosques nubosos que contribuyen con su porte aéreo a la formación de las precipitaciones horizontales o nieblas, característicos de determinadas áreas tropicales, como en Centroamérica o Asia oriental (Bruijnzeel et al., 2005), pero que se dan también en otras partes del mundo donde los vientos oceánicos cargados de humedad penetran tierra adentro, como en las Islas Canarias (Ceballos & Ortuño, 1952) o en la franja costera de Oregon (Ingwersen, 1985)

A las grandes regiones climáticas del mundo se les asocia con sus correspondientes vegetaciones climáticas, lo que

evidencia que el bosque natural existe donde el clima le permite. Sin embargo, cuando este concepto se particulariza para un lugar concreto, el análisis de la situación hay que plantearlo de forma específica para el mismo; pues éste se encontrará, en el momento que se analiza, en una determinada fase de su serie evolutiva hacia el climax. Este aspecto es esencial cuando se plantean repoblaciones forestales como medio para restaurar las cuencas vertientes degradadas; porque el bosque no sólo requiere de unas condiciones climáticas o pseudoclimáticas favorables, sino también que el medio mantenga la capacidad necesaria para su recuperación.

3. EL BOSQUE EN LA ATENUACIÓN DE LAS AVENIDAS Y DE LAS INUNDACIONES

- ¿Interviene el bosque en la dinámica de la formación de las avenidas?
- ¿En qué medida puede contribuir el bosque a atenuar las inundaciones?

En la génesis de toda inundación siempre existe un proceso torrencial, que se inicia con un aguacero o con la fusión repentina del manto de nieve. No existe una relación lineal entre la magnitud de la precipitación y la magnitud del caudal de avenida generado por ella (que se representa por un hidrograma¹), sino que depende de manera muy importante de la duración y forma de los aguaceros. La simulación de este fenómeno requiere conocer el hietograma² para definir la precipitación (real o de cálculo). A partir de esta precipitación se efectúa la estimación de la escorrentía superficial (que se conoce también como precipitación efectiva o neta), para concluir con la generación del hidrograma del aguacero (Figuras 2 y 3).

En el tránsito entre la precipitación y la escorrentía superficial, principal generadora del hidrograma de avenida, intervienen las características de la cuenca vertiente, entre ellas el uso del suelo o tipo de vegetación que sustenta. Por tanto, la vegetación y por ende el bosque (que es el estado más desarrollado de la vegetación) influye en la generación de las inundaciones; al incidir en la formación de las escorrentías y condicionar con ello la generación de los caudales de avenida, que en último término, dependiendo del tipo de tormenta que se trate y de las características hidráulicas del cauce, pueden llegar a causar las inundaciones.

Luego, si es posible modificar el uso del suelo en la cuenca vertiente, también lo es el influir en las avenidas y en

1. El hidrograma es un gráfico que correlaciona los caudales con su tiempo de paso, curvas en las Figuras 2 y 3)

2. El hietograma es un gráfico que establece la distribución temporal de la precipitación, rectángulos en las Figuras 2 y 3)

consecuencia en las inundaciones; la cuestión radica en la medida en la que se consigue influir, tanto para el caso de las avenidas como para el de las inundaciones.

La experiencia demuestra que tratándose de precipitaciones moderadas o de eventos torrenciales ordinarios, el bosque reduce significativamente tanto el volumen de escorrentía como el pico de avenida en el hidrograma de tormenta; pero para eventos torrenciales extremos, aunque la reducción sea consecuencia del mismo proceso físico que el que tiene lugar con los restantes tipos de precipitaciones, su efecto puede no ser lo suficiente como para modificar sustancialmente los caudales de avenida y, por tanto, no condicionar en la práctica el resultado final de las inundaciones.

En este contexto, cuando la capacidad de retención de agua del bosque (tanto en su cubierta aérea como en su

suelo) se satura, el retardo en la curva descendente del hidrograma de tormenta tiende a desaparecer y, tras alcanzar el hidrograma su caudal punta de avenida, éste tiende a perpetuarse, atenuándose únicamente por el efecto del tránsito de la avenida. En la práctica esta situación se presenta ante la ocurrencia de precipitaciones torrenciales extremas y requiere además que el evento presente una cierta duración, tanto mayor cuanto mayor sea la superficie de la cuenca hidrográfica (aunque en la última fase no es necesario que continúe manteniéndose el régimen torrencial). En consecuencia: A medida que aumenta la magnitud de una precipitación extrema, generadora del caudal de avenida, los posibles efectos del bosque en la atenuación de la avenida son cada vez menos relevantes. Figura 3.

Otra cuestión a considerar es la repercusión que tiene la superficie de la cuenca vertiente en la generación de los

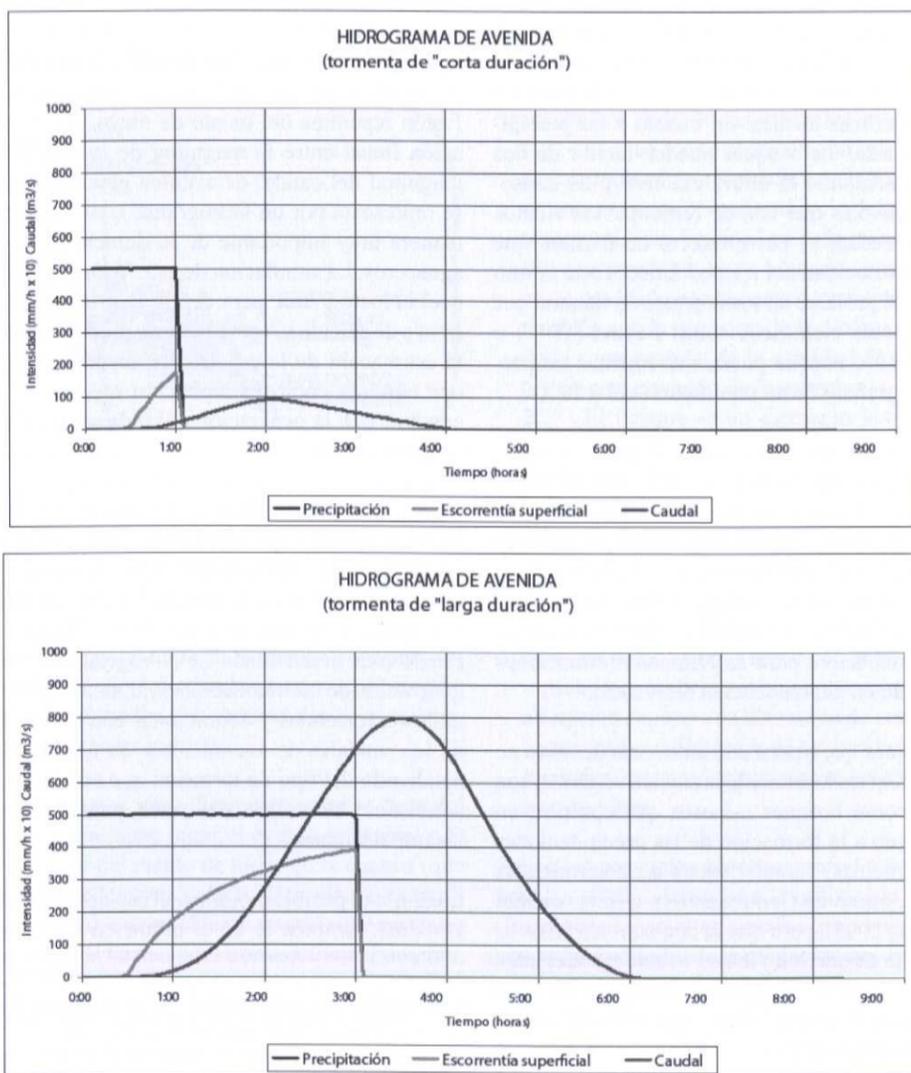


Figura 2. Generación del hidrograma de aguacero. En el gráfico inferior se observa que conforme aumenta la duración de la precipitación disminuye la capacidad de infiltración del suelo, aumentando con ello la precipitación neta y el caudal punta del aguacero.

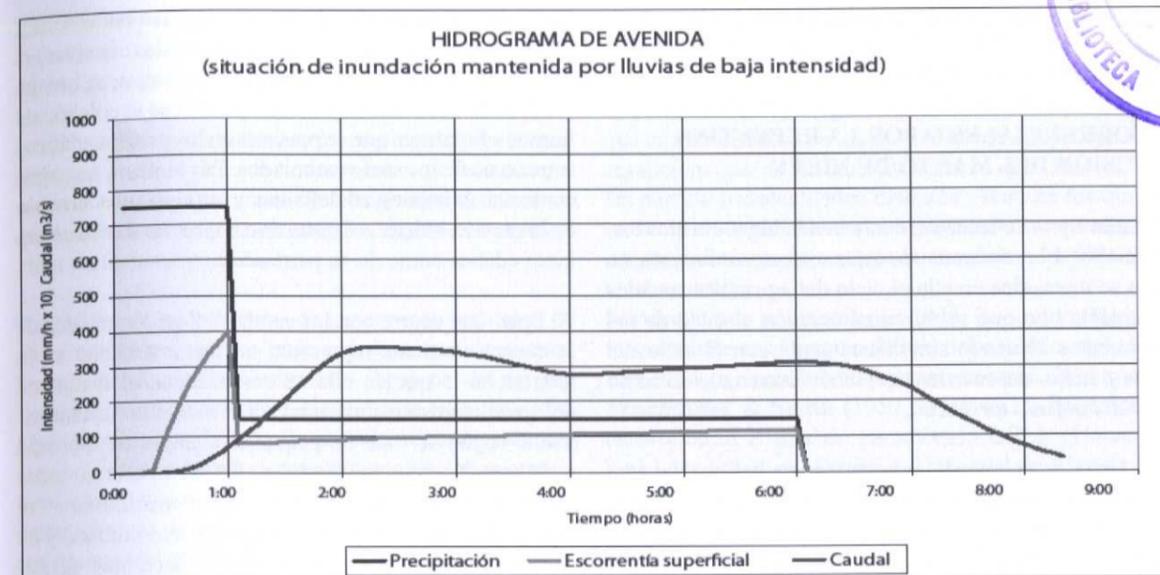


Figura 3. Hidrograma de un aguacero de tormenta, para una situación de inundación.

hidrogramas. Analizando a éstos, por mera lógica se pone en evidencia que para secciones del cauce que abarcan grandes cuencas vertientes, que comprenden superficies muy extensas (> 100.000 Km²), los bosques tienen una influencia muy reducida o prácticamente nula en la atenuación de las grandes avenidas y, en consecuencia, sobre las inundaciones causadas por las precipitaciones extremas.

Pero para que esta hipótesis sea formalmente válida, se deben cumplir además dos premisas: 1) que la precipitación extrema tenga lugar a la vez en toda la cuenca o al menos sobre una superficie importante de la misma, lo que normalmente no es muy probable, pero puede ocurrir tratándose de ciclones o huracanes; 2) que realmente exista una proporción significativa de bosque en dicha cuenca (para que se pueda asegurar que éste influye), lo que salvo situaciones muy particulares tampoco es frecuente.

En consecuencia, resulta lógico admitir que en grandes cuencas hidrográficas el efecto de los bosques en la atenuación de las avenidas presenta serias limitaciones ante precipitaciones torrenciales extremas, cuando éstas abarcan superficies importantes dentro de la cuenca y se prolongan en el tiempo.

Pero la situación puede ser diferente tratándose de secciones del cauce que abarquen cuencas pequeñas (< 100 Km²), pues en ellas el tiempo de concentración de la avenida t_c^3 está limitado por las características morfológicas

3. El tiempo de concentración t_c es el tiempo que tarda la escorrentía superficial que se pone en movimiento en el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca, en llegar a la sección de salida de la misma. Se acostumbra a medir en horas.

de la cuenca, lo que a su vez reduce al tiempo punta del hidrograma de avenida, condicionando a que el caudal punta del hidrograma presente dos limitaciones: 1) la que se deriva de la propia morfología de la cuenca y 2) la que resulta, en el caso de existencia del bosque, de la reducción aplicada a la precipitación para convertirla en escorrentía superficial.

Las conclusiones del desarrollo lógico-matemático de la evolución de las inundaciones que se acaba de exponer, siguiendo los principios de la Hidrología Analítica, coinciden en lo esencial con los resultados de numerosas experiencias realizadas en cuencas comparadas por diversos investigadores (citados por Andréassian, 2004) o por Bruijnzeel et al. (2005). Es cierto que el bosque interviene en la generación de las avenidas, pues aumenta la infiltración del agua en el suelo y retiene agua en las copas de los árboles por intercepción; pero cuando las precipitaciones son muy intensas y prolongadas, el suelo y las copas se saturan y el efecto de las superficies arboladas de la cuenca en la atenuación de los volúmenes de escorrentía y de los caudales punta de avenida no es apreciable, o resulta del mismo orden de magnitud que la falta de certeza en la medición de la propia descarga; en esos momentos ocurren las inundaciones.

Pero no se debe olvidar que en las cuencas hidrográficas, cualquiera que sea su tamaño, ocurren multitud de eventos torrenciales ordinarios, para los que el bosque tiene efectos beneficiosos; regulando eficientemente las escorrentías superficiales y transmitiendo sus efectos finales hasta la atenuación de las avenidas y, sobre todo, que estos eventos torrenciales ordinarios son mucho más frecuentes que los extremos.

4. EL BOSQUE EN EL CONTROL DE LOS PROCESOS GEOTORRENCIALES QUE SE DESENCADENAN EN LA CUENCA VERTIENTE, POR CAUSA DE LOS EVENTOS TORRENCIALES O POR LA REPENTINA FUSIÓN DEL MANTO DE NIEVE

Cuando en una cuenca vertiente tienen lugar eventos torrenciales, sobre todo cuando éstos son extraordinarios, no sólo se intensifica en ella el ciclo del agua (los caudales líquidos), sino que se moviliza también el ciclo de los sedimentos actuando simultáneamente con el ciclo del agua y ambos desencadenan el fenómeno conocido como *geo-dinamismo torrencial*.

Por tanto, se trata analizar la incidencia del bosque ante este fenómeno, que se inicia con la erosión en la cuenca vertiente y en sus cauces de drenaje, continúa con el transporte de los materiales erosionados por las escorrentías y por los flujos de avenida y concluye con el depósito de los sedimentos transportados, cuando la corriente pierde energía y, por tanto, capacidad para transportarlos. Los fenómenos del geo-dinamismo torrencial se intensifican cuando son provocados por eventos torrenciales extremos, afectando a la estabilidad de los terrenos de la cuenca y en la seguridad de sus habitantes y sus bienes.

Por tanto, los efectos del bosque en relación con las avenidas y las inundaciones, no se reducen únicamente a una moderación en el volumen de escorrentía y en el pico de la avenida generados por el evento torrencial; sino que incide también en el control de la erosión del suelo en la cuenca, lo que repercute en la reducción de la carga sólida en suspensión que transportan los cursos que drenan por la misma, y en la disminución de la tensión cortante de la corriente que circula por ellos, lo que se puede traducir en una reducción del transporte sólido de fondo. Estos últimos aspectos pueden resultar tan importantes o más que la propia atenuación del caudal líquido de avenida, especialmente en cuencas torrenciales de montaña.

El suelo forestal resta energía cinética al movimiento superficial del agua sobre el terreno, al presentarle una mayor rugosidad para su circulación; asimismo los suelos forestales tienen una mayor porosidad que los agrícolas, lo que contribuye a una mayor retención del agua por infiltración. Por ambas razones, el agua dispone dentro del bosque de una menor capacidad para disgregar y transportar las partículas de suelo, en definitiva de erosionar el suelo. Finalmente, el bosque también aporta un efecto de colchón protector al suelo ante el impacto de las gotas de lluvia.

En relación con la última cuestión, investigaciones recientes han puesto su atención en que el bosque puede contribuir a incrementar el volumen de la gota de agua que llega al suelo, con el consiguiente aumento lineal de su energía de impacto sobre el mismo; pero cabe advertir

que en los bosques naturales (no alterados ni por el sobrepastoreo ni por los aprovechamientos o talas abusivos) el efecto, que pudiera producirse por esta causa, se atenúa por la capacidad amortiguadora que ofrece el colchón de humus y hojarasca que se presenta en los perfiles edáficos superiores de los suelos arbolados. Por tanto, si se quiere conservar la capacidad del bosque para proteger al suelo de la erosión hídrica, es necesario conservar su estructura tanto edáfica como de su parte aérea.

Al igual que ocurre con los caudales líquidos, el área de la cuenca vertiente representa un factor esencial en la manera en la que en ella se desencadena el fenómeno del geodinamismo torrencial, diferenciando sustancialmente según se trate de pequeñas cuencas de montaña o de grandes cuencas fluviales. En las primeras, todas las fases del geodinamismo torrencial se manifiestan, o al menos se pueden manifestar, en un espacio limitado y en un corto periodo de tiempo, lo que le hace muy agresivo, además de presentarse con una recurrencia reducida (periodos de retorno entre 10 y 25 años); mientras que en las segundas los distintos procesos del geo-dinamismo torrencial (erosión, transporte y sedimentación) se manifiestan mejor diferenciados espacial y temporalmente y el geo-dinamismo torrencial, como una realidad conjunta, se presenta únicamente con ocasión de eventos torrenciales extremos y con periodos de recurrencia normalmente muy prolongados. Ante estas circunstancias, es lógico que la función protectora que realiza el bosque, generalizando cualquier cubierta vegetal, resulta muy diferente dependiendo del tipo de cuenca que se considere.

Los efectos del bosque ante el geo-dinamismo torrencial desencadenado en las pequeñas cuencas de montaña

Desde los tiempos de los primeros ingenieros correctores de las cuencas vertientes a los torrentes de montaña en la Europa del siglo XIX, el principal efecto que se le ha atribuido al bosque es su capacidad de sujeción y estabilización del suelo en las laderas con fuertes pendientes ante las escorrentías superficiales; contribuyendo con ello a disminuir también la descarga sólida que llega a los torrentes. Por ello se justifica la repoblación forestal de estas cuencas vertientes y, en las laderas que no es factible asentar la repoblación, la práctica de faginas y palizadas (estructuras vegetales leñosas flexibles, normalmente del género *Salix* sp., que se instalaban en el suelo siguiendo curvas de nivel para que, tras enraizar y rebrotar, aumenten la resistencia del terreno a la tensión de corte de la lámina de escurrido). Se trata de trabajos selvícolas, cuya finalidad es la de estabilizar las laderas. Lo que queda claro de estas operaciones, es que se prefiere la vegetación leñosa frente a la no lignificada y dentro de la leñosa al arbolado. Además, la repoblación forestal de las cuencas de montaña ha servido también para asegurar el mantenimiento y la efectividad a lo largo del tiempo de los trabajos de corrección hidráulica realizados en los torrentes.

Esta filosofía se mantiene a pesar de que en las últimas décadas se ha cuestionado en alguna ocasión el modo de realizar ciertas obras y también se ha planteado, en los casos que resulta viable, la conveniencia de adecuar la corrección de los torrentes a criterios de reconstrucción geo-morfológica y a la adecuación paisajística del entorno, pero siempre y cuando la seguridad de las obras quede debidamente garantizada y los objetivos a proteger estén perfectamente cubiertos.

Tratándose de las cabeceras de las cuencas vertientes de alta montaña tropical en América Latina, conviene señalar que cuando en ellas se conserva el pajonal del páramo en buenas condiciones sobre andosoles de gran capacidad higroscópica; éste desempeña en dichas cuencas una protección similar a la que ejercen las repoblaciones protectoras efectuadas en el pasado en Europa en las cabeceras de las cuencas de montaña; con la ventaja que no requiere de mantenimiento, mientras se conserve inalterado; lo que no ocurre con las repoblaciones, que al ser casi siempre coetáneas, necesitan de trabajos selvícolas, para asegurar su persistencia.

Los efectos del bosque ante el geo-dinamismo torrencial que se manifiesta en las cuencas fluviales

El geo-dinamismo torrencial no es ajeno a las grandes cuencas fluviales, pero sólo en circunstancias muy especiales, que coinciden con precipitaciones torrenciales extremas que afectan a una gran parte de la cuenca (lo que únicamente es previsible para largos periodos de retorno), sus efectos presentan la misma dinámica que en las pequeñas cuencas torrenciales. Cuando esto ocurre, se trata de situaciones que pueden clasificarse de desastre, cuando no de catástrofe.

En las restantes situaciones, aunque en el campo de la investigación se plantee el estudio conjunto de todos los procesos que integran el geo-dinamismo torrencial aplicando modelos hidrológicos; en la práctica agronómica es frecuente analizar los diferentes procesos por separado; pues es obvio que en las grandes cuencas existen superficies que, por sus características fisiográficas, son aptas para cultivos o pastizales, a los que naturalmente se dedican; aunque existan también superficies que por sus pendientes elevadas y características edáficas conviene mantenerlas con cubiertas permanentes arboladas, para controlar con ellas los procesos geo-torrenciales que se pueden generar. Por tanto, los distintos efectos geo-torrenciales se manifiestan de manera diferenciada en las distintas partes de la cuenca y en consecuencia se abordan también de un modo particular en cada una de ellas.

En este contexto, tiene sentido analizar de un modo específico los problemas causados por la erosión hídrica en cultivos y pastizales, cuando afectan a extensas superficies cuya productividad e incluso su propia existencia como sistemas productivos resulta amenazado. Estos planteamientos tienen especial repercusión en las medidas de

conservación de suelos en dichas áreas, aspecto que se relaciona directamente con los sistemas agronómicos sustentables, cuyo antecedente moderno se puede situar en la Clasificación Agrológica de Suelos de **Bennett** (1939), que en el transcurso de los años se ha ido adaptando a los condicionantes de las nuevas técnicas agronómicas y a las particularidades de los distintos países en los que se ha ido introduciendo. En la actualidad su implantación resulta prácticamente universal. También el **USDA Soil Conservation**

Service, desde su creación en 1935, ha contribuido sustancialmente en el estudio de la erosión hídrica del suelo y en la adopción de medidas para su control. En el mismo **Wischmeier & Smith** (1959, 1960, 1972, 1974, 1978) desarrollaron el modelo paramétrico **USLE** (Universal Soil Loss Equation -Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo-) para estimar la erosión potencial del suelo ($t \cdot ha^{-1}$). Una modificación de la **USLE** planteada por **Williams** (1975), permitió establecer el modelo **MUSLE** (Modified Universal Soil Loss Equation -Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada-) para estimar los sedimentos emitidos por una cuenca vertiente (t) durante un aguacero concreto. Por último, en las últimas décadas se ha desarrollado el modelo **RUSLE** (Revised Universal Soil Loss Equation -Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada-), que manteniendo la estructura inicial del modelo **USLE**, mejora la determinación de las pérdidas de suelo, gracias a una mayor precisión en la definición de los parámetros que lo integran para la situación objeto de análisis. Bajo el punto de vista agronómico la **RUSLE** tiene notables prestaciones, pero su aplicación se reduce en la práctica a fincas o a situaciones en las que se dispone de una buena información pluviométrica, edáfica y de la cubierta vegetal.

Ante esta situación: *¿dónde y cuando es necesario mantener el bosque, en las grandes cuencas hidrográficas?* Antes de responder a esta pregunta, se recuerda que el bosque, especialmente el *bosque climático*, es la formación vegetal más estable en la estación donde se ubica, es decir, es la que mejor aprovecha la energía que le proporciona la naturaleza para ubicarse en dicho lugar y en consecuencia la que mejor protege al suelo ante el geo-dinamismo torrencial. (Es importante señalar que lo dicho no implica que el bosque sea la única formación estable, sino que el bosque es estable donde las condiciones climáticas lo condicionan; en climas muy fríos de montaña también pueden ser estables otras formaciones no arbóreas).

En consecuencia, si la alteración de ese estado natural no supone la aparición de problemas geo-torrenciales en la cuenca ante la incidencia en ella de eventos torrenciales, porque la energía que queda liberada resulta fácilmente controlable, cuando no aprovechable; como ocurre, por ejemplo, en la sustitución de los bosques de llanura por pastizales; la cuestión bajo el punto de vista de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca no reviste discusión, se da al suelo el uso que mejor se adapte a las necesidades

de la población. Pero si sucede lo contrario, por ejemplo, se trata de un bosque en una ladera de fuerte pendiente ubicada en la cabecera de una cuenca, en la que, en el caso de sustituir el bosque por un pastizal, la energía del agua de escorrentía cause erosión en el suelo e incluso pueda producir deslizamientos superficiales ante aguaceros extraordinarios; la situación debe hacer pensar que, aunque inicialmente el pastizal proporcione una mayor escorrentía en las precipitaciones ordinarias, el peligro de deslizamientos ante precipitaciones extraordinarias, invita a plantear como algo muy razonable la conservación del bosque en el paraje en cuestión.

En la España de los años cincuenta del siglo pasado, ante el avance de la erosión del suelo en los terrenos cultivados con escasa capacidad agronómica para tales usos, se planteó definir unos criterios de adecuación de los cultivos y pastizales en el territorio, reservando las áreas más vulnerables a la erosión hídrica a la vegetación permanente, especialmente la arbolada. En este escenario **García Nájera** estableció y publicó su *Ecuación de la pendiente máxima admisible en cultivos (1954) y pastizales (1955)*. En síntesis el autor (tras cálculos analíticos y ensayos en un canal de laboratorio) propuso lo siguiente: Definió para los cultivos dos pendientes críticas a las que denominó: pendiente de iniciación de la erosión (para la que estableció un valor entre el 7 y 8 %) y pendiente de arrastre total (que lo determinó en un 18 %); mientras que para los pastizales sus cálculos puramente analíticos le llevaron a establecer que, para asegurar su conservación en buenas condiciones *no debían extenderse en terrenos con más del 30 % de pendiente*. Aunque fueran estudios analíticos, únicamente ensayados en un canal de laboratorio, resultaban coincidentes con las recomendaciones de **Bennett**.

Basándose en dichos trabajos y en las recomendaciones de la FAO, **López Cadenas de Llano & Blanco Criado** (1968) establecieron los *índices de protección del suelo por la vegetación*, ampliando el valor de la *pendiente de iniciación de la erosión hasta el 12 %*. Implícitamente estos índices se utilizaron durante mucho tiempo en España, como un criterio para establecer las zonas prioritarias para la repoblación forestal en las cuencas vertientes necesitadas de restauración hidrológico-forestal. Dichos índices presentan valores relativos, que van desde 1,0 (máxima protección) a 0,0 (protección nula) y se corresponden para cada tipo de suelo diferenciado dentro de la cuenca. Para los autores, su utilización se centra en las siguientes propuestas: 1) Mientras el terreno no supere la pendiente del 12 % (*pendiente de iniciación de la erosión*), se trata de suelos agrícolas, sujetos únicamente a las buenas prácticas de cultivo y a la conservación de su productividad. 2) A partir del 12 % de pendiente y hasta alcanzar la *pendiente de arrastre total* (que dependiendo de los tipos de suelo varía entre el 18% y el 24 % de pendiente) los suelos siguen manteniendo su vocación agrícola, pero necesitan de prácticas importantes de conservación de suelos, como

las terrazas o los abancalados, para controlar en ellos la erosión hídrica; que también podría ser regulada dedicándolos a pastizales. 3) Los pastizales bien conservados aseguran una buena protección al suelo frente a la erosión hídrica hasta el 30 % de pendiente, disminuyendo a partir de este valor conforme aumenta el gradiente del terreno y 4) A partir del 30 % de pendiente la única opción que garantiza la correcta protección del suelo ante la erosión hídrica es una cubierta vegetal lignificada, de matorral denso y cubriendo totalmente el suelo y como opción preferible el bosque. A partir de 1975 se generalizó el uso del modelo USLE en España, siendo uno de sus mayores impulsores **López Cadenas de Llano**.

Se completa este epígrafe comentando algunas cuestiones en relación con la vegetación de riberas. Su uso es normalmente conveniente: a) porque evita un importante aporte de sedimentos directos al cauce procedentes de sus vertientes laterales directas y b) incrementa la resistencia de los márgenes del cauce a la abrasión producida por la tensión tractiva de la corriente en avenidas ordinarias. Ambos efectos contribuyen a la protección del cauce y a mejorar la calidad de las aguas. Lógicamente la vegetación de riberas, como cualquier otra, tiene su consumo de agua; pero sus efectos beneficiosos ante avenidas torrenciales ordinarias compensan su mantenimiento. En caso de avenidas torrenciales extraordinarias, sus efectos positivos se limitan y es preciso prever los problemas que pueda generar, debido tanto al mayor calado que adoptaran los caudales circulantes como consecuencia de la mayor rugosidad del cauce, como por el hecho de que la corriente lo arranque y a continuación lo arrastre aguas abajo; por lo que conviene controlarla, manteniendo especies de raíces pivotantes que presenten una buena sujeción al terreno y atendiendo a la edad y al estado sanitario de la vegetación, para evitar posibles taponamientos en secciones del cauce aguas abajo, en las que se podrían acumular los residuos vegetales, sobre todo los que tienen tañamos apreciables.

Al respecto se remite al lector al documento **D22** del Proyecto EPIC FORCE *El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce*, Lenzi *et al* (2007).

Los efectos del bosque en el control de los fenómenos nivales.

El bosque de montaña, hasta la altitud a la que consigue instalarse por las limitaciones que le imponen las condiciones climáticas y edáficas, desempeña un papel hidrológico y de protección del suelo en la cuenca vertiente de primer orden; pero además contribuye de varias formas a la estabilidad del manto de nieve, disminuyendo con ello el riesgo de desprendimiento de aludes. Los aludes sobrevienen cuando, debido a una inestabilidad local, se produce una rotura en el equilibrio del manto de nieve en la montaña, desencadenando un deslizamiento ladera abajo de grandes masas de nieve en ocasiones a velocidades muy elevadas.

El bosque de montaña contribuye de varias formas a la estabilidad del manto de nieve:

- a) Sus troncos constituyen excelentes puntos de anclaje al terreno que frenan la reptación de la nieve.
- b) En el momento de la nevada, sobre todo en los bosques de hoja perenne, las copas conservan una gran parte de la nieve, que solamente cae después de empujar la metamorfosis destructiva.
- c) La cubierta forestal atenúa los efectos del enfriamiento, lo que conduce a una metamorfosis más rápida que en el terreno al descubierto.

En relación con el apartado anterior c) el bosque genera un microclima en su interior, de este modo las temperaturas dentro del mismo pueden ser superiores a las del exterior durante el invierno y viceversa durante el verano, lo que afecta a la metamorfosis del manto de nieve retenido dentro de él (es decir, en las transformaciones internas que experimentan los cristales de las distintas capas que forman el manto de nieve durante el invierno, debido a las variaciones de los gradientes de temperatura que experimenta dicho manto de nieve a lo largo del mismo y a la incorporación de agua líquida al inicio del periodo de fusión en primavera).

El bosque impide el desprendimiento de aludes, por tanto se le considera una medida de protección activa frente a su riesgo; pero es incapaz de frenarlos una vez que se han desprendido.

Para altitudes superiores al bosque, en los pastizales de montaña la primera nieve se adhiere mejor al terreno, si el ganado ha pastado ya en ellos; porque la hierba rasa hace el efecto de alfombra cepillo, mientras que las hierbas largas se inclinan bajo el peso de la nieve y ofrecen una superficie lisa favorable al deslizamiento. En los matorrales de montaña la nieve penetra entre los numerosos huecos que presenta su estructura vegetal, lo que impide que se forme una buena adherencia de la nieve al terreno y de las capas del manto de nieve entre sí, favoreciendo con ello su deslizamiento.

5. LA REPERCUSIÓN DE LAS CUBIERTAS ARBOLADAS EN LAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS DE LA CUENCA VERTIENTE EN LOS PERIODOS QUE TRANSCURREN ENTRE EVENTOS TORRENCIALES CONSECUTIVOS

En el panorama actual diversos investigadores Calder (1997, 1998, 1999, 2002), Bruijnzeel (1989, 1994, 2004, 2005), Huber & Iroume (2001), Iroume & Huber (2002), entre otros, han constatado que la transformación de extensas superficies de una cuenca vertiente de desarboladas a arboladas o viceversa, modifica el estado de las disponibilidades de agua en las diferentes áreas de ésta. Este aspecto tiene especial interés en la ordenación agrohidrológica de una cuenca vertiente, pues condiciona el posible aprovechamiento del recurso agua por sus pobladores.

Para iniciar el análisis de la cuestión, se recurre a los resultados obtenidos de las experiencias realizadas en cuencas comparadas. Se adopta el planteamiento descrito por Adréassian (2004), quién al presentar sus propios resultados, se apoyó en los trabajos realizados por otros investigadores, entre ellos en los de Bosch & Hewlett (1982) y Cosandey (1993, 1995).

El principio de las cuencas comparadas se basa en seleccionar dos cuencas vertientes tan similares como resulte posible, lo que permite suponer que ambas tendrán una reacción similar ante las incidencias climáticas; pero inevitablemente cada cuenca presenta sus propias peculiaridades, por lo que se requiere monitorizar ambas durante un determinado periodo para entender sus diferencias. Hipotéticamente el periodo preliminar de calibración debe ser lo suficientemente prolongado para conseguir una caracterización completa de ambas cuencas. Al final del periodo de calibración se modifica el uso del suelo en una de las cuencas (cuenca de tratamiento), permaneciendo inalterable en la otra (cuenca de control). La relación entre las cuencas antes del tratamiento se utiliza para reconstruir el flujo de los cursos en la cuenca tratada, lo que permite valorar el impacto del tratamiento en mm de precipitación o en m³ s⁻¹ de flujo.

Las hipótesis del diseño experimental son: a) Las dos cuencas deben ser muy similares y con un comportamiento muy parecido. b) Ambas cuencas deben estar próximas geográficamente, para asegurarse que están sujetas a las mismas variaciones climáticas. c) La cuenca de referencia debe permanecer inalterada en todo el periodo de estudio. De este modo se aporta a las experiencias una invariabilidad entre cuencas y una invariabilidad del clima.

El efecto de la deforestación en una cuenca vertiente

Adréassian (2004) manteniendo la presentación adoptada por **Bosch & Hewlett** (1982) en sus experiencias, agregó a éstas los resultados publicados en los 20 años posteriores, llegando a considerar un total de 137 experimentos en cuencas comparadas; 115 relativas a la deforestación y 22 a la reforestación. Los resultados se muestran en la Figura 4.

En la Figura 4 resulta obvio que la deforestación aumenta las escorrentías (interpretado como volumen de agua disponible y también denominado cosecha de agua), mientras que la repoblación lo disminuye; pero también se observa que los resultados son extremadamente dispersos y parece conveniente señalar que el análisis no hace referencia a lluvias torrenciales, ni contempla los efectos geo-torrenciales.

Por otra parte, **Adréassian** observó que en la Figura 4 se planteaban dos cuestiones: 1) Resulta difícil interpretar el verdadero sentido de la máxima variación anual, ya que depende del volumen de precipitación anual en los años posteriores al tratamiento y 2) El impacto del tratamiento

no es estable en el tiempo para la mayor parte de las experiencias en cuencas comparadas. Esta cuestión fue detectada también por **Hibbert et al.** (1975) y para mejorar la interpretación del impacto del tratamiento propusieron comparar la relación precipitación/escorrentía antes y después del tratamiento, como se muestra en la Figura 5.

En cualquier caso, las experiencias en cuencas comparadas evidencian que el bosque no supone una mayor disponibilidad de recursos hídricos de forma inmediata, sino más bien lo contrario; por lo que si lo que se pre-

tende es disponer a corto plazo de la mayor proporción del volumen de agua recibida en la cuenca a través de las precipitaciones, las formaciones vegetales de menor consumo de agua, como los pastizales, favorecen la escorrentía superficial y con ello su posible almacenamiento y consiguiente aprovechamiento.

Pero conviene señalar que esta opción, que activa el ciclo del agua al favorecer la escorrentía, también activa el ciclo de los sedimentos; por lo que en situaciones en las que el geo-dinamismo torrencial en la cuenca resulta muy

intenso, puede derivar en efectos colaterales como el de un incremento de la erosión del suelo, que no resultan deseables en la cuenca vertiente, lo que puede justificar la presencia del bosque en ciertas áreas de la misma.

El efecto de la recuperación de la cubierta arbolada en la cuenca vertiente tras su deforestación

Salvo en casos de cuencas degradadas, el bosque tiende a colonizar de nuevo la cuenca que ha sido deforestada, si no se toman las medidas necesarias para impedirlo. A esta conclusión llegó **Hibbert** (1967) tras observar el comportamiento hidrológico en varias cuencas experimentales en Coweeta (Estados Unidos), durante el periodo en el que recuperan sus cubiertas vegetales tras su deforestación. Se percató que la única forma de mantener desforestada la cuenca era actuando permanentemente sobre ella, pues de otro modo ésta se volvía a cubrir con la aparición de los sucesivos estadios evolutivos de la vegetación climática. Comprobó que los efectos de la deforestación tenían una duración breve en las cuencas vertientes analizadas, de manera que transcurridos entre 7 y 25 años desde su tratamiento y, según las cuencas, su efecto sobre las escorrentías prácticamente se anulaba. A conclusiones similares llegaron otros investigadores citados por **Andréassian** (2004).

Andréassian (2004) describió asimismo los trabajos y resultados de varios investigadores en Coshocton, en relación con los efectos de la repoblación forestal en el régimen hidrológico de una cuenca vertiente de carácter agrícola que había sido repoblada; en la que se comprobó que en los primeros años tras la repoblación la reducción de las escorrentías era muy rápida, pero que ésta se estabilizaba a partir de los 10-15 años. El mismo **Andréassian** (2002) utilizando un registro más largo de la misma cuenca, observó que la tendencia se decantaba hacia la estabilización de las escorrentías conforme el arbolado se consolidaba, lo que señalaba que el consumo de agua en los bosques maduros se reduce, hasta establecer un equilibrio con el medio.

Además diversos autores han verificado que los efectos indicados están relacionados con la fisiología de las diferentes especies arbóreas, que alcanzan sus máximos valores de transpiración coincidiendo con sus periodos de mayor crecimiento. Así lo han comprobado, por ejemplo, los hidrólogos australianos **Vertessy et al.**, (1995, 1997, 2001) y **Roberts et al.** (2001) en las masas de eucaliptos; llegando a establecer que en ellas se alcanza un máximo en la transpiración hacia los 15 años de edad, que se corresponde con su estado de mayor crecimiento. Parece lógico pensar que en especies de crecimiento más lento este pico en la transpiración se retrase en unos años.

Resumiendo, de los resultados de las experiencias efectuadas en cuencas comparadas, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

1. En algunas cuencas vertientes se pueden presentar determinadas circunstancias en las que, ante el incremento de consumo hídrico que supone una cubierta arbolada, se plantee la conveniencia de su sustitución por otra cubierta vegetal de menor porte y consiguiente menor consumo hídrico; especialmente cuando dicho diferencial resulta determinante para otros fines o apremie disponer del mismo en forma de escorrentía y su posterior almacenamiento. Conviene señalar que desde una perspectiva teórica la cuestión no presenta objeciones; pero como se ha indicado, el incremento de las escorrentías implica una activación simultánea de los ciclos del agua y de los sedimentos; por lo que ante precipitaciones torrenciales puede suponer un aumento del riesgo de erosión en el suelo, lo que conviene tenerlo previsto.

2. La información que aportan las cuencas de tratamiento, durante el periodo en el que la vegetación arbolada se regenera en las mismas, tiene especial interés; pues muestra que en los 10-20 primeros años de su regeneración, que coincide con su fase de mayor crecimiento, corresponde con los de mayor consumo hídrico. Pero el turno de las especies forestales es más prolongado y, cuando el arbolado alcanza su pleno desarrollo, sus exigencias hídricas se estabilizan dependiendo de su fisiología y de las condiciones de la estación en la que se ubica (definidas por su clima y suelo, es decir, por las condiciones climáticas o pseudo-climáticas).

3. Es conocido entre los repobladores que cuando una determinada especie arbórea no se atempera a las condiciones climáticas de la estación en la que se implanta, vegeta mal y termina por desaparecer de un modo natural o adopta un porte achaparrado. Los estudios de los fito-climatólogos ponen de manifiesto que cada especie de arbolado tiene unas características culturales que le hacen aptas para determinadas estaciones; lo que en ningún caso quiere decir que la vegetación pueda condicionar el clima, pero sí lo inverso.

Antes de concluir con las aportaciones facilitadas por las cuencas comparadas: se comentan también dos aspectos que establecen sus limitaciones: a) La mayor parte de las experiencias en cuencas comparadas se refiere a pequeñas cuencas de menos de 2 Km², por tanto, existe un efecto de escala de difícil cuantificación. b) El incremento de la escorrentía no se debe interpretar como cosecha de agua, traducción directa del inglés water harvest, pues una cosecha es el resultado de una producción, que sólo es posible en seres vivos, como son las plantas; el agua verifica la ecuación de continuidad, por tanto se mantiene constante; lo único que puede variar es su forma de aprovechamiento.

Las conclusiones obtenidas a partir de las cuencas comparadas son clarificadoras, pero la relación entre el bosque y las disponibilidades hídricas en la cuenca vertiente es muy compleja y en ella influyen también otros factores, especialmente: a) La ubicación del bosque dentro la cuen-

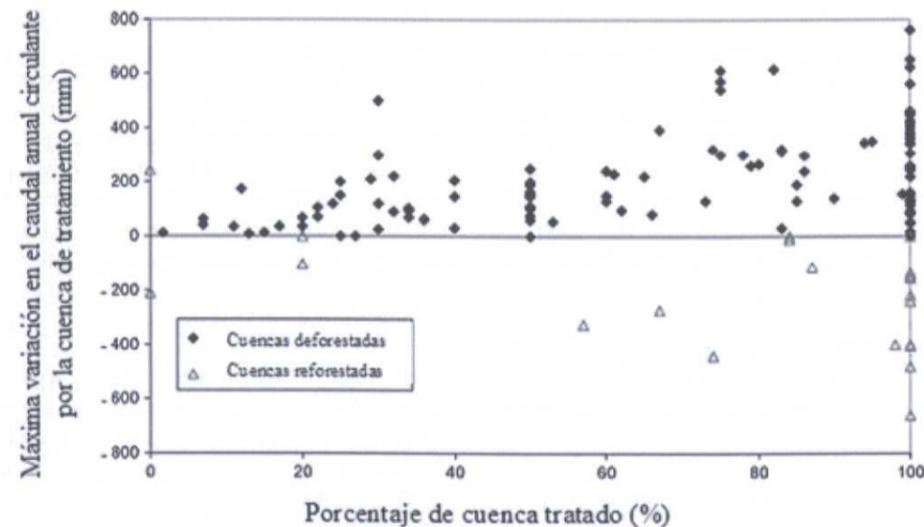


Figura 4. Máxima variación anual de la escorrentía (mm) en función del porcentaje de la cuenca sujeta a tratamiento siguiendo a Bosch & Hewlett (1982), Andréassian (2004).

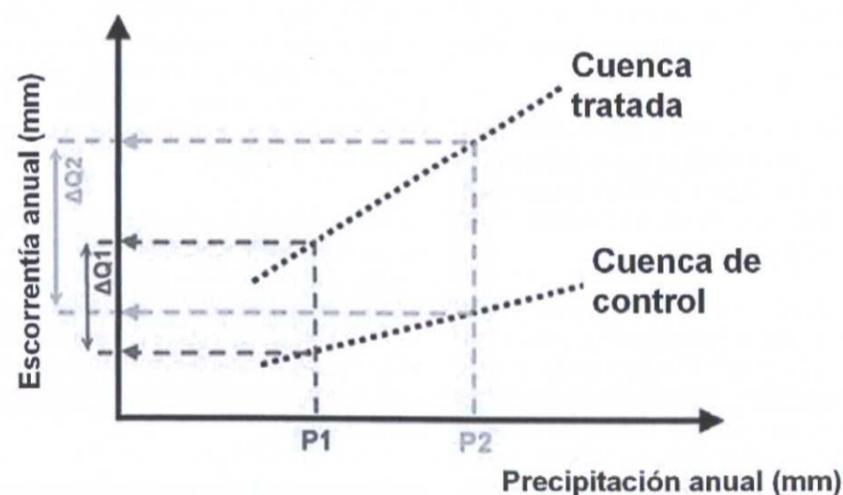


Figura 5. Variación de la relación precipitación/escorrentía entre una cuenca tratada y la cuenca de control para la precipitación anual. Hibbert et al. (1975). Andréassian (2004).

ca y la situación geográfica y altimétrica de esta última; b) La superficie de la cuenca y sobre todo su estado físico, difiriendo sustancialmente si se trata de cuencas degradadas que se pretenden recuperarlas, o de cuencas en buen estado de conservación y con una alta capacidad productiva. Es difícil disponer de un auténtico modelo de comportamiento de los bosques, salvo que se lleve trabajando un largo período en ellos. La experiencia es fundamental para planificar el futuro de las masas arboladas, por ello es importante la existencia de Servicios Forestales permanentes; pero a modo de ejemplo, se comentan dos situaciones prácticas significativas:

1) Cuando se trata de repoblaciones forestales que abarcan superficies importantes en las cabeceras de cuencas bien conservadas (con abundante suelo), en los años siguientes en los que el repoblado se encuentra en su estado de máximo crecimiento, es previsible que se produzca una alteración del ciclo del agua en la cuenca y, en consecuencia, se experimente una disminución en las disponibilidades de agua en las áreas dominadas, hasta que el ciclo del agua en la cuenca se estabilice de nuevo cuando el arbolado se haya consolidado en las áreas dominantes. Evidentemente esta situación no es equiparable a la que presentan las cuencas degradadas, en las que la disponibilidad de suelo y agua en sus cabeceras son muy reducida, por lo que difícilmente pueden secar fuentes aguas abajo.

2) En el caso ya comentado de los bosques de nieblas que ocupan las áreas dominantes de una cuenca vertiente, su tala o desaparición acarrea también problemas por la reducción de agua en las áreas dominadas, al desaparecer el suministro de agua que facilitaba el bosque de cabecera con la condensación de las nieblas en su vuelo.

6. LA REFORESTACIÓN CON FINES DE RESTAURAR LA CUENCAVERTIENTE Y SU INCIDENCIA EN LAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS DE LA MISMA

Bruijnzeel *et al.* (2005), remitiéndose a las regiones tropicales, comentan tres creencias relacionadas con las repoblaciones forestales: 1) La reforestación incrementa las precipitaciones. 2) La reforestación devuelve el flujo a los ríos (particularmente en la estación seca). 3) Las especies usadas en la reforestación son todas similares en cuanto a sus efectos (positivos) hidrológicos. Ante ellas, los autores contraponen los resultados obtenidos con la investigación científica: 1) No hay evidencia de que la reforestación incremente las precipitaciones (salvo situaciones de bosques nubosos). 2) A corto plazo (< 20 años) la reforestación disminuye la escorrentía directa y el caudal base. 3) Las especies de rápido crecimiento tienden a usar más agua que las de crecimiento lento y los efectos hidrológicos varían proporcionalmente con el área reforestada y con la densidad de la plantación. Al margen de dichas creencias, en la práctica se ha asumido desde siempre, tanto en la agricultura como en la selvi-

cultura, la necesidad de disponer del agua que permita desarrollar ambas actividades. En el caso de la agricultura se plantea incluso la adición de agua por riego para cubrir dicha necesidad; tratándose de la selvicultura no se recurre al riego, pero se extreman las medidas en la *elección de la especie* y en la *preparación del suelo* anterior a la plantación, para optimizar el aprovechamiento de las reservas hídricas del suelo. Las primeras seleccionando las especies que tienen capacidad para atemperarse al medio donde se implantan (que sean climácicas o pseudo-climácicas de estadios anteriores al climax): Las segundas para mejorar las condiciones del suelo para retener el agua de las precipitaciones en los años siguientes a la plantación, a fin de que ésta pueda superar las condiciones adversas del medio en dichos años.

La cuestión del consumo de agua por las masas arboladas no ha sido debidamente considerada hasta las últimas décadas; porque en las repoblaciones con fines de protección de cuencas ante los eventos torrenciales realizadas en el pasado, se hacía prevaler la protección del suelo frente a la erosión hídrica, supeditando prácticamente todo a este objetivo. Sin embargo, conviene señalar al respecto, que los restauradores de cuencas vertientes en la Europa meridional se toparon en ocasiones con problemas relacionados con la falta de humedad en los suelos a repoblar, a causa del escaso perfil edáfico de éstos; lo que les obligó a mejorar las técnicas de preparación del suelo para asegurar las repoblaciones forestales y lograr superar precisamente las condiciones de precariedad de unos terrenos que eran objeto de reforestación; en los que se pretendía generar suelo forestal, para evitar las escorrentías que estaban degradando las laderas.

Las circunstancias expuestas contrastan con las que se presentan en un páramo bien conservado, asentado sobre un andosol profundo, cuya capacidad para retener el agua puede ser elevada; pero podrían parecerse si el páramo se degradara por años de roturaciones y inadecuado uso de sus suelos.

En cualquier caso, conviene matizar que no todas las repoblaciones forestales son iguales: a) ni por sus objetivos, las hay de *protección* de la cuenca ante los eventos torrenciales; de *producción* de madera y/o frutos; o *otros fines*; b) ni por las técnicas empleadas en su implantación en el territorio; c) ni por el consumo de agua y nutrientes de las mismas. A continuación se muestran una serie de características que permiten diferenciar entre las repoblaciones de *producción* y de *protección*:

1. En las repoblaciones productivas, que en ocasiones pueden ser altamente productivas como algunas plantaciones de pinos o eucaliptos en Chile, las condiciones del medio para acoger a la plantación suelen ser favorables e incluso pueden llegar a ser óptimas; en tales circunstancias las características fisiológicas de la planta a introducir son un factor determinante en la *elección de especie*, porque permite asegurar la

producción esperada con la plantación. En algunos casos estas repoblaciones se llegan incluso a abonar y el ciclo productivo es relativamente corto (utilizando el término forestal clásico, se hablaría que el turno de corta está entre 15-30 años). Estas plantaciones presentan similitudes con los cultivos agrícolas y por tanto la corta final (normalmente a hecho o mata-rasa) se identifica con la cosecha y se le denomina de este modo. En este tipo de plantaciones tiene pleno sentido contemplar el balance hídrico de las mismas, para asegurar el rendimiento sustentable de las propias plantaciones; pero, sobre todo, para no desabastecer las necesidades hídricas aguas abajo de su ubicación.

2. Las repoblaciones con fines protectores tratan de controlar la erosión del suelo en la propia superficie que se repuebla y de proteger a la cuenca vertiente, especialmente en sus áreas dominadas o valles, de los efectos que el geodinamismo torrencial le pueda causar, cuando en ella ocurren eventos torrenciales, especialmente cuando tales eventos son extraordinarios. Muchas de estas repoblaciones se llevan a cabo en situaciones límites (regiones semiáridas y sobre suelos degradados), extremando las medidas en la elección de especie y en la preparación del suelo previa a la repoblación, para aprovechar el escaso suelo y agua disponibles, con el objetivo de mejorar el futuro de ambos recursos a través la creación de suelo forestal con la repoblación. En estas repoblaciones la elección de especie no se limita a conocer las características fisiológicas de la planta y a asegurarse su perfecto estado sanitario, sino que también hay que considerar la capacidad de la especie para atemperarse al medio en el que se instala (autoecología), y la posibilidad de mejorar el suelo para los primeros años de la repoblación, lo que exige un buen conocimiento edafológico del área a repoblar y del comportamiento hidrológico de las técnicas de preparación del terreno para la repoblación. Si la repoblación prospera, lógicamente la masa arbolada transpira y necesita de recursos hídricos para subsistir, pero al mismo tiempo sus sistemas radicales van generando un suelo forestal, donde anteriormente existía un suelo degradado, y éste permitirá en el futuro un mejor aprovechamiento del agua procedente de las precipitaciones. Masas arboladas con estas características existen, su producción forestal es muy baja, pero su objetivo es constituir una infraestructura de protección de la cuenca ante eventos torrenciales.

7. CONCLUSIONES FINALES A MODO DE AFORISMOS

1. Los recursos hídricos se localizan dentro del ciclo del agua y resulta demostrable que el bosque, entendido como suelo forestal y cobertura arbolada, incide en dicho ciclo, luego el bosque influye en el ciclo del agua.

2. Salvo que se trate de precipitaciones horizon-

tales o nieblas, características de los bosques nubosos y debidas a la condensación en la cubierta arbórea de la humedad de los vientos oceánicos que penetran tierra adentro; para los restantes tipos de precipitaciones (orográficas, convectivas, ocultas, rocíos y escarchas) la inferencia del bosque no es relevante y, de serlo, se trata de fenómenos localizados. No se ha comprobado que el bosque afecte a las precipitaciones ciclónicas.

3. El efecto del bosque en la atenuación de las avenidas es mayor para los eventos torrenciales ordinarios que para los extraordinarios; así como en las pequeñas cuencas de montaña que en las grandes cuencas fluviales. No obstante, hay que tener presente que en las cuencas vertientes, cualquiera que sea su tamaño, son mucho más frecuentes los eventos torrenciales ordinarios que los extraordinarios.

4. Cuando en una cuenca vertiente tienen lugar eventos torrenciales extraordinarios, no sólo se intensifica en ella el ciclo del agua (caudales líquidos), sino también el de los sedimentos (caudales sólidos), actuando simultáneamente y desencadenando el *geodinamismo torrencial* (erosión en la cuenca vertiente y en sus cauces de drenaje; transporte de los sedimentos por el flujo de escorrentía y por los caudales de avenida y depósito de los mismos en las áreas dominadas de la cuenca). El bosque actúa con efectividad en la amortiguación del fenómeno del *geo-dinamismo torrencial*, en tal sentido su incidencia es muy superior a la que tiene sobre los caudales líquidos considerados de forma aislada; porque al proteger al suelo de la cuenca de la erosión hídrica, reduce también la emisión de sedimentos y el grado de aterramiento de las áreas de inundación de la cuenca. Sin embargo, su influencia disminuye conforme los eventos torrenciales resultan más extraordinarios y las cuencas vertientes presentan mayores superficies.

5. A lo anterior, hay que añadir que el bosque es la mejor defensa activa ante el fenómeno de desprendimiento de aludes, lo que supone otro factor importante a considerar en la ordenación hidrológico-forestal de las cuencas de montaña.

6. El bosque tiene un elevado consumo de agua por transpiración, que adquiere su máximo valor cuando los árboles se encuentran en su estado de mayor crecimiento, que depende de la especie (según sea de crecimiento rápido o lento) y del clima de la estación donde se ubica (sea clima templado-frío, templado, templado-cálido o tropical). Para climas templados y tratándose de especies de crecimiento rápido (como algunas especies de eucaliptos o pinos) su período de mayor consumo hídrico se encuentra entre los prim-

eros 10-20 años. Este periodo se reduce en climas tropicales y se incrementa para climas más fríos.

7. Pasado el periodo de máximo desarrollo vegetativo en los árboles, éstos reducen su consumo hídrico, que va descendiendo conforme envejece la masa, hasta establecer un equilibrio con el medio. En dicha situación, que se puede identificar con el estado climácico o pseudoclimácico (dependiendo de la especie y de su ubicación), el bosque es la formación vegetal que mejor aprovecha las condiciones de agua, suelo y energía disponibles y, por tanto, la más estable.

8. La cuestión del consumo de agua por evapotranspiración tiene especial importancia en las repoblaciones, donde los árboles son coetáneos, especialmente si ocupan extensiones importantes en la cuenca vertiente y sobre todo si las repoblaciones se ubican en la cabecera de la cuenca, encontrándose ésta bien conservada y con 21 abundantes reservas hídricas; en cuyo caso el nuevo arbolado puede secar manantiales situados aguas abajo durante el tiempo que transcurre hasta alcanzar la situación de equilibrio (climácico o pseudoclimácico).

9. Sin embargo, la situación anterior no se puede identificar con las repoblaciones de cabecera con fines protectores, realizadas sobre suelos pobres, sujetos a una fuerte erosión superficial, en los que el estado actual de los terrenos no es capaz de almacenar el agua de lluvia. Se trata de repoblaciones cuyo objetivo es generar suelo forestal, que favorezca la infiltración y reduzca la escorrentía superficial y la erosión del suelo en cabecera. En estas repoblaciones adquieren especial importancia la elección de la especie (que debe atemperarse al medio en el que se instala) y las técnicas preparación de suelo (que mejoren sus condiciones para retener el agua de las precipitaciones, para que en los años siguientes a la plantación ésta pueda superar las condiciones adversas del medio).

10. Tratándose de cuencas tropicales andinas de alta montaña, el pajonal del páramo, si se encuentra bien conservado, realiza las mismas funciones protectoras que los bosques de cabecera de las cuencas alpinas europeas y no requiere de las labores selvícolas de mantenimiento de éstas; luego representa la mejor opción en la ordenación de la cuenca.

11. Numerosas experiencias, efectuadas en cuencas comparadas, han demostrado que la tala del bosque existente en una cuenca vertiente incrementa la escorrentía en ésta; lo que permite que sea almacenada y utilizarla para otros usos.

Pero las mismas cuencas comparadas han puesto en evidencia que, si la cuenca no se encuentra degradada,

vuele a recuperar su tapiz vegetal siguiendo las etapas graduales de su sucesión climácica y reduciendo los incrementos de escorrentía conforme el crecimiento de la nueva vegetación arbolada incrementa sus necesidades hídricas.

12. En algunas cuencas y ante situaciones concretas, el consumo hídrico adicional que supone el bosque, sobre todo en el periodo de los 10-20 primeros años de una repoblación, puede plantear la conveniencia de sustituirlo por otro tipo de cubierta vegetal de menor consumo hídrico, como los pastizales; cuando el diferencial de consumo hídrico con el arbolado se requiera para otros fines; por lo que apremia disponer del mismo en forma de escorrentía y su posterior almacenamiento. Pero conviene aclarar que al incrementar la escorrentía, se acelera junto con el ciclo del agua el ciclo de los sedimentos, lo que puede acarrear problemas geotóxicos colaterales en caso de presentarse eventos torrenciales en la cuenca, aspecto que se debe evaluar previamente.

13. El bosque, especialmente el bosque climácico, es la formación más estable porque es la que mejor aprovecha la energía que le proporciona la naturaleza para situarse en el lugar donde se ubica y, por ello, la que mejor protege al suelo frente al geodinamismo torrencial. En consecuencia, si la alteración de ese estado natural no amenaza con la aparición de problemas, porque la energía que se libera resulta fácilmente controlable, cuando no aprovechable; como ocurre, por ejemplo, en la sustitución de los bosques de llanura por pastizales; la cuestión bajo el punto de vista de la ordenación agro-hidrológica no reviste discusión, se proporciona al suelo el uso que mejor se adapte a las necesidades de la población. Pero si sucede lo contrario, por ejemplo, se trata de un bosque en una ladera de fuerte pendiente ubicada en la cabecera de una cuenca, en la que, en el caso de sustituir el bosque por un pastizal, la energía del agua de escorrentía cause erosión en el suelo e incluso pueda producir deslizamientos superficiales ante aguaceros extraordinarios; la situación debe hacer pensar que, aunque inicialmente el pastizal proporcione una mayor escorrentía en las precipitaciones ordinarias, el peligro de deslizamientos ante precipitaciones extraordinarias, invita a plantear como algo muy razonable la conservación del bosque en el paraje en cuestión.

14. En síntesis, el ciclo del agua y el de los sedimentos dentro de la cuenca vertiente está supeditado a las ecuaciones físicas de continuidad (conservación de la masa) y del movimiento (conservación de la cantidad de movimiento y conservación de la energía). El bosque incide en ambos ciclos, amortiguando sus

efectos. Algunas investigaciones han prestado mayor atención al ciclo del agua, acentuando el peso de la ecuación de continuidad en relación con este recurso y en sus conclusiones se han especializado en los efectos de las cubiertas vegetales en el aprovechamiento del agua como recurso. Otras investigaciones, cronológicamente anteriores, se han centrado casi exclusivamente en los problemas de erosión del suelo y la consiguiente degradación de la cuenca hidrográfica, lo que les ha conducido a dar mayor peso a la ecuación de la dinámica del agua, atendiendo de un modo implícito a la ecuación de continuidad. El desarrollo de uno u otro tipo de investigación responde a las prioridades adoptadas al inicio de cada una de ellas. Ambas resultan complementarias, aunque tengan también un campo específico para su desarrollo, y ambas son útiles y necesarias. Pero en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente se deben compaginarlas para que resulten efectivas.

15. Junto a ellas se debe contemplar la vegetación climácica como la formación más estable en el medio y la que mejor utiliza la energía que recibe. El bosque constituye en numerosas ocasiones la vegetación climácica de la estación donde se ubica; por lo que ante su previsible sustitución, se debe analizar el modo de aprovechar o disipar la energía que se libera, especialmente ante las situaciones derivadas de los eventos torrenciales que tengan lugar en la cuenca.

16. En la ordenación agro-hidrológica de una cuenca es preciso considerar las necesidades de la población que habita en ella; por tanto, resulta necesario compaginar el bosque con otros usos del suelo que proporcionan los medios necesarios para su mantenimiento; reservando al bosque la función de infraestructura que le corresponde, que sirva para proteger a la cuenca ante eventos torrenciales, para evitar su degradación física y para mantener su equilibrio biológico durante los periodos entre eventos torrenciales.



8. BIBLIOGRAFÍA

- Andréassian V. (2004) Waters and Forests: from historical controversy to scientific debate, *Journal of Hydrology* num. 291, pp 1-27
- Bennet H. H. (1939) Soil Conservation, Mac Graw-Hill Co., pp. 993, New York.
- Bosch J. M.; Hewlett J. D. (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, *Journal of Hydrology*, num. 55, pp. 3-23.
- Bruijnzeel L. A. (2004) Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?, *Agriculture Ecosystems and Environment*, num. 104, pp. 185-228,
- Elsevier. Bruijnzeel L. A.; Bonell M.; Gilmour D. A.; Lamb D. (2005) Conclusion: Forests, water and people in the humid tropics: an emerging view, *From Forests, water and people in the humid tropics: Past, present and future hydrological research for integrated land and water management*, Bonell M. & Bruijnzeel L. A., eds. Cambridge University Press UNESCO, pp. 906-925.
- Calder I. R. (1998) Water use by forests: limits and controls, *Tree Physiology*, num. 18, pp.625-631. 23
- Calder I. R. (1999) The Blue Revolution, *Land use and Integrated Water Resources Management*, pp. 192, Earthscan Publications Ltd., London.
- García Nájera J. M. (1943, 1962) Principios de Hidráulica Torrencial y sus aplicaciones a la corrección de torrentes, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias I. F. I. E., pp. 297, Madrid.
- García Nájera J. M. (1954) Pendientes máximas admisibles en las tierras de cultivo y cálculo de las terrazas intermitentes con desagüe para la conservación del suelo (banquetas de infiltración), I. F. I. E., pp. 29, Madrid
- García Nájera J. M. (1955) El bosque, el agua y la conservación del suelo, pendiente máxima admisible en los pastizales, I. F. I. E., pp. 7, Madrid
- Hewlett J. D. (1982) Principles of Forest Hydrology, pp. 183, The University of Georgia Press, Athens.
- Hibbet A. R. (1967) Forest treatment effects on water yield. In Sopper W. E. Lull H. W. (eds.) *Forest Hydrology*, Proceedings of a National Science Foundation at Advanced Science Seminar, Pergamon Press, Oxford, pp 527-543.
- Hibbet A. R.; Davis E. A.; Brown T. C. (1975) Managing chaparral for water and others resources in Arizona, *Watershed Management Symposium*, ASCE Longan, Utah, pp. 445-468.
- Lenzi M. A.; Comiti F.; Mao L.; Andreoli A.; Pecorari E.; Rigon E.; Picco L. (2007) El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce (Best practice guidelines for dealing with large wood debris) pp. 175, Deliverable D22, Equipo del Proyecto EPIFORCE de la Universidad de Padova (Italia).
- López Cadenas de Llano F.; Blanco Criado M. (1968) Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales, I.F.I.E., pp. 187, Madrid
- Mintegui Aguirre J. A.; López Unzu F. (1990) La Ordenación agro-hidrológica en la planificación, *Servicio de Publicaciones del Gobierno Vasco*, pp. 306, Vitoria.
- Mintegui Aguirre J. A.; De Simón Navarrete E.; García Rodríguez J. L.; Robredo Sánchez J. C. (1993) La restauración hidrológico-forestal de las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea, *Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca*, pp. 325, Sevilla.
- Mintegui Aguirre J. A.; Robredo Sánchez J.C. (en prensa) Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las aguas suelos y bosques en cuencas de montaña, pp. 182, PH UNESCO, Montevideo (Uruguay).
- Molchanov A. A. (1960; 1963, traducido al inglés; 1966, 2ª edición inglesa) *The hydrological role of forests*, pp. 407, Academy of Science of the U.R.S.S. (traducido por A. Gourevitch (Israel Program for Scientific Translation).



Medición del Transporte de Sedimentos y Curvas de Descarga de Sedimentos

J.C. Bathurst

(Universidad de Newcastle upon Tyne, Reino Unido)

Traducción al español: M.D. Montagnini, Ing. M.L. Amsler
(Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina)

OBJETIVOS E INTRODUCCIÓN

Objetivos

Cuando haya completado este documento, usted podrá:

- Comprender por qué es necesario realizar mediciones de transporte de sedimentos;
- Identificar cómo se clasifican los sedimentos transportados por los ríos, de acuerdo a su origen, al mecanismo de transporte y al tamaño de las partículas;
- Conocer distintos aspectos requeridos para la medición del transporte de las cargas en suspensión y de fondo;
- Conocer las características deseables en un buen captador de sedimentos;
- Reconocer los instrumentos necesarios para realizar mediciones de carga suspendida y de fondo;
- Comprender las bases de las técnicas de medición del transporte de la carga suspendida y de fondo;
- Conocer cómo determinar el caudal sólido a partir de datos de campo;
- Distinguir diferentes procedimientos para la medición de la distribución de tamaños del material de fondo;
- Entender el concepto de la curva de descarga de sedimentos y cómo es utilizada para calcular la producción de sedimentos;
- Conocer cómo se obtiene la curva de descarga de sedimentos;
- Comprender las aproximaciones y fuentes de errores asociadas con las curvas de descarga;
- Saber determinar la producción de sedimentos utilizando una curva de descarga;
- Conocer las circunstancias bajo las cuales las curvas de descarga de sedimentos pueden ser aplicadas con confiabilidad.

El presente documento describe los instrumentos y técnicas para la medición en campo del caudal de sedimentos en suspensión, de la carga de fondo y de la distribución de tamaños del material constitutivo del lecho, como medios de obtener datos para verificar y desarrollar ecuaciones de transporte.

Sobre la base de los conceptos de curvas de descarga y de duración de caudales, también se introduce el uso de curvas de descarga de sedimentos para determinar la producción de sedimentos, para casos en los que no hay mediciones disponibles.

1. ¿QUÉ ES EL SEDIMENTO?

A los fines del presente documento, se define a los sedimentos como los productos resultantes de los procesos de erosión de la superficie del suelo (por ejemplo, en campos o en laderas de montañas) y del fondo de los ríos y sus márgenes. Los materiales resultantes de la erosión de la superficie del suelo ingresan a los ríos ya sea cayendo, rodando o acarreados hasta allí por la acción de diversos agentes como la escorrentía superficial, el viento y las actividades humanas.

Generalmente se considera al sedimento constituido por partículas sólidas o material fragmentado inorgánico, como arcilla, arena o grava. Pero en el presente documento no se consideran como sedimento materiales orgánicos, disueltos o en solución.

El **transporte de sedimento fluvial** refiere al movimiento del sedimento debido al flujo de agua en ríos o canales. Se cuantifica como caudal sólido, por medio de su peso seco o volumen, expresado en unidades de $kg\ s^{-1}$ o m^3s^{-1} .

La concentración de sedimento en el agua se puede medir como la relación entre el peso seco de las partículas y el peso total o volumen de la mezcla agua-sedimento, expresada en unidades de $mg\ l^{-1}$ o partes por millón (ppm).

El transporte se produce por diferentes mecanismos, dependiendo de la energía del flujo y del peso o tamaño de los sedimentos.

2. CLASIFICACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El transporte de sedimentos puede clasificarse según el origen del material y los mecanismos mediante los cuales se produce.

2.1. Clasificación según el origen

El sedimento que se transporta en cualquier tramo de un río proviene de dos orígenes principales:

- **carga de material del fondo:** la parte del caudal sólido total que se compone de partículas del tamaño de las que se hallan en el fondo del mismo río;

- **carga de lavado:** la fracción del caudal sólido total compuesta por partículas de tamaños menores que las que constituyen el fondo del río; está condicionada por la disponibilidad y suministro de los productos de la erosión que afectan las márgenes y las áreas de pendiente pronunciada, aguas arriba del sitio considerado. La carga de lavado, en general, presenta una pobre correlación con el caudal líquido debido a su dependencia de la disponibilidad de material que proviene de zonas de suministro externas al río.

No existe una división abrupta entre las dos cargas en términos del tamaño del sedimento, pero el diámetro de partícula de 0,0625 mm (límite entre arena y limo) se cita habitualmente como el tamaño divisorio.

2.2. Clasificación según el mecanismo de transporte

El sedimento se transporta mediante dos mecanismos dominantes:

- **carga de fondo:** sedimento que se mueve en contacto con el fondo por saltación (movimiento constituido por una sucesión de saltos y rebotes, característico del transporte de arenas), rodamiento o deslizamiento. Típicamente, es el material más grueso que se transporta;
- **carga suspendida:** el sedimento que se sostiene en el seno del fluido por la acción de las componentes ascendentes de las corrientes turbulentas y permanece en suspensión durante un tiempo considerable. Es el material más fino que se transporta.

La carga de fondo es aproximadamente el 5-25% de la carga suspendida para grandes ríos de profundidad considerable. Sin embargo, puede igualar o exceder la carga suspendida en ríos de montaña, más pequeños, con fondos de gravas y cantos rodados.

2.3. La carga total

La suma de la carga de material de fondo y la carga de lavado constituye la carga total. De igual manera, la combinación de la carga de fondo y carga suspendida constituye la carga total. Las relaciones entre las cargas de material de fondo y de lavado, y las cargas de fondo y suspendida se muestran en la Figura 1.

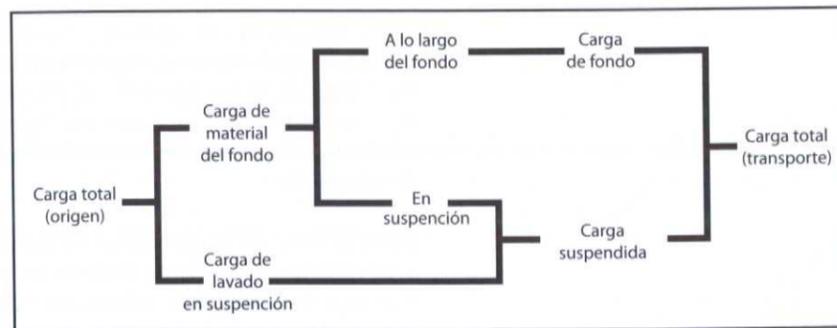


Figura 1. Relación entre cargas de sedimento clasificadas por su origen y por los mecanismos de transporte.

Nota: no se debe confundir la carga de fondo con la carga de material de fondo. En tanto tienen sedimentos en común, refieren a diferentes criterios de clasificación del transporte de sedimentos.

3. CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE SEDIMENTO

El sedimento puede clasificarse mediante el uso de términos como arcilla y arena. Estos vocablos de uso extendido tienen una aplicación generalizada fuera del vocabulario científico, pero refieren a rangos de tamaño específico para la ciencia. Se conoce una gran cantidad de criterios de clasificación, difiriendo unos

de otros en cuestiones de menor consideración. De estas clasificaciones, se presenta una típica en la Tabla 1.

Los materiales más finos de las fracciones arcilla y limo presentan comportamiento cohesivo -lo que implica que las partículas individuales tienen la propiedad de "adherencia"- . Pueden "adherirse" unas con otras para formar partículas de mayor tamaño, proceso que se conoce como floculación. Los contaminantes son preferentemente absorbidos por las partículas de tamaños menores del sedimento, las que de esta manera proveen un importante mecanismo para su transporte.

Tabla 1. Una clasificación posible de tipos de sedimento.

Rango de tamaño (mm)	Tipo	Características
0,00024 - 0,004 0,004 - 0,062	Arcilla Limo	Cohesivo. Se mueven en suspensión. Constituyen la carga de lavado.
0,062 - 2	Arena	No cohesivo. Se mueven como carga suspendida y de fondo. Forman la carga de material de fondo (en algunos casos, también carga de lavado).
2 - 64 64 - 250 250 - 2000	Grava Guijarros Cantos rodados	No cohesivo. Se mueven como carga de fondo. Forman la carga de material de fondo.

4. ¿POR QUÉ SON NECESARIAS LAS MEDICIONES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS?

Las mediciones se efectúan para determinar directamente la carga de sedimentos, para establecer o verificar relaciones analíticas o empíricas para el cálculo de la carga de sedimento (por ejemplo, ecuaciones de transporte de sedimento o curvas de descarga) y para calibrar y validar modelos de transporte de sedimento físicos y numéricos. Son ejemplos de situaciones en las que se requiere efectuar mediciones: la predicción de la tasa de sedimentación en un embalse o presa proyectados, la estimación de la velocidad de atascamiento de plantas de suministro de agua y canales de irrigación, el control del efecto que producen los cambios en el uso del suelo sobre los ambientes fluviales, y la verificación de un modelo de transporte de sedimentos a lo largo de una red fluvial.

Las técnicas e instrumentos necesarios para las mediciones varían según el tipo de transporte y de río. En particular, se utilizan distintos procedimientos para la medición del **transporte de carga en suspensión y de fondo**. Sin embargo, puede resultar difícil definir el límite entre los dos tipos de carga, y existe la posibilidad que el captador utilizado para la carga de fondo tome una parte de

la carga en suspensión (conocido como problema de la doble captura). La suma de las cargas medidas de fondo y suspendida proporciona una estimación de la carga total.

5. MEDICIÓN DEL TRANSPORTE DE LA CARGA EN SUSPENSIÓN

La concentración del sedimento suspendido varía en la dirección vertical, incrementándose fuertemente cerca del fondo. El tamaño de las partículas también aumenta hacia el fondo. El perfil resultante de concentración depende del tamaño de las partículas y de la velocidad e intensidad de la turbulencia.

Los tamaños más pequeños se distribuyen de manera aproximadamente uniforme en la vertical (por ello la carga de lavado aparece uniformemente distribuida en la mayoría de las situaciones). En cambio, los tamaños mayores de partículas presentan un perfil de concentración sesgado en la región próxima al fondo (ver Figura 2).

Para determinar el transporte de la carga suspendida, se debe medir la **concentración de sedimentos C** y luego calcular la **descarga sólida en suspensión** como CQ , donde Q es el caudal líquido. En una sección transversal es necesario obtener muestras de varios puntos, tanto en dirección lateral como vertical, e integrar los resultados a

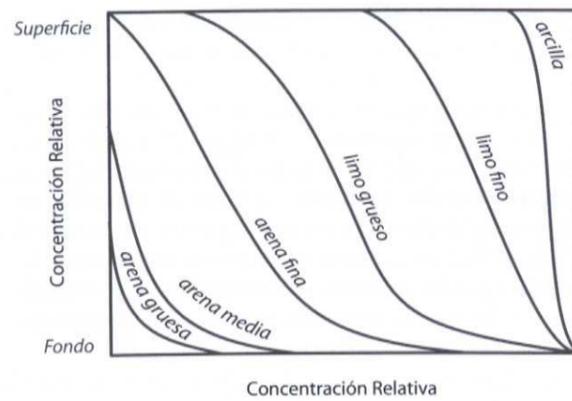


Figura 2. Variación vertical de la concentración de sedimentos suspendidos para tamaños seleccionados de partículas en un flujo dado

lo ancho de la sección para determinar un valor promedio, dado que la carga *suspendida de material de fondo* no se distribuye uniformemente (como la velocidad del flujo) (ver Figura 3). La concentración de sedimentos también varía con el tiempo, según pulsos de sedimento alternados con intervalos de menor concentración. Por lo tanto, la toma de muestras debe realizarse a lo largo de períodos suficientemente largos para que esas fluctuaciones se promedien entre sí.

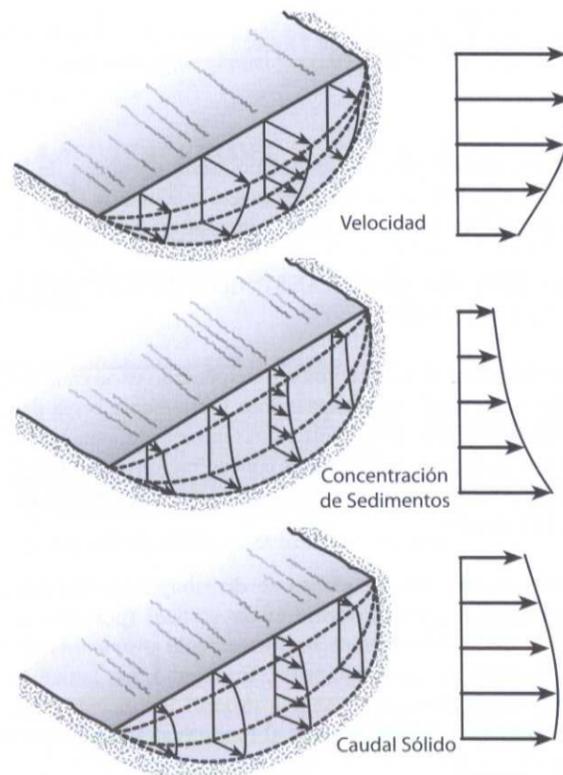


Figura 3. Caudal sólido de sedimentos suspendidos obtenido integrando el producto de concentración y velocidad a lo ancho del río

Dado que la mayor parte del transporte de sedimentos ocurre asociada a los caudales altos, es esencial que las muestras se obtengan durante esos períodos cuando se intentan establecer promedios a largo plazo. Se requiere tomar mayor número de muestras cerca de la ocurrencia del caudal pico, de modo que permitan fijar bandas de error; durante los períodos de caudales bajos o estacionarios, es suficiente una cantidad menor de muestras. Sin embargo, los esquemas de muestreo que se planifiquen generalmente requieren de un compromiso entre la precisión exigida y limitantes prácticas, tales como tiempo y costo de la operación.

Los muestreos de rutina habitualmente se realizan en los mismos lugares seleccionados para la medición de caudales líquidos. De todos modos las muestras deberán ser obtenidas aguas arriba de zonas de aguas quietas (lagunas) o de muy baja velocidad, ya que estas podrían actuar como trampas de sedimentos. Las muestras captadas deberán permitir representar la distribución de material en suspensión a lo ancho de la sección, lo que se puede lograr tomando muestras en varios puntos de la misma. Alternativamente, se puede aprovechar la mezcla que se produce en zonas de alta turbulencia, como las hoyas al pie de saltos de agua. Todos los tamaños de partículas se encuentran uniformemente presentes en suspensión, por lo tanto una muestra única puede proporcionar la medida de la concentración promedio en el flujo con razonable exactitud.

5.1. Características de un buen captador

- Origina mínima perturbación del flujo y los sedimentos. Esto es posible mediante un diseño hidrodinámico, y el uso de una boquilla pequeña de entrada de la mezcla agua-sedimento. Se requiere la existencia de un orificio que permita la salida del aire del interior del recipiente captador para asegurar que la velocidad de ingreso a través de la boquilla sea aproximadamente igual a la velocidad de la corriente.
- Evita errores en la concentración medida debidos a las fluctuaciones en cortos períodos de tiempo. Esto se logra tomando la muestra durante un intervalo de tiempo adecuado.
- Proporciona resultados que pueden relacionarse con la velocidad (o caudal), para determinar el caudal de carga en suspensión.

5.2. Tipos de captadores

- Un captador **instantáneo** atrapa en un intervalo muy corto de tiempo un cierto volumen de la mezcla agua-sedimento. Es útil en estudios oceanográficos y en lagos donde las velocidades y fluctuaciones turbulentas son bajas.
- Un captador **integrador** toma un cierto volumen de la mezcla agua sedimento a lo largo de una distancia o período de tiempo.

- **Integrador puntual:** obtiene la muestra en un punto, integrando a través de un período de tiempo para promediar las fluctuaciones turbulentas.

- **Integrador en profundidad:** se mueve a velocidad constante en la vertical, integrando en profundidad. Se hace descender el captador a través de la corriente a velocidad vertical constante hasta alcanzar el fondo; luego se sube a velocidad constante hasta la superficie. El resultado es una muestra integrada cuya cantidad en cualquier profundidad está proporcionalmente relacionada con la velocidad (o caudal) en esa profundidad. La duración de la operación se determina por el tiempo requerido para casi llenar la botella del captador, y se puede obtener a partir de las curvas de velocidad de llenado para la boquilla particular que se utilice, en caso de ser conocida la velocidad del escurrimiento. En general, la velocidad de descenso del equipo de muestreo no debe exceder el 40% de la velocidad media del flujo, para evitar que se formen ángulos pronunciados entre la boquilla y el flujo de aproximación. En una sección transversal al escurrimiento se obtiene un determinado número de muestras a partir de las cuales se determina la carga de sedimentos suspendidos total en dicha sección.

El captador **US DH-48** es el instrumento estándar para corrientes vadeables con caudales específicos inferiores a 1 m²s⁻¹ (ver Figura 4). Consiste en una estructura (o camisa) con diseño hidrodinámico, que contiene una botella de leche y se opera con una barra de vadeo. Se dispone de otras versiones del mismo captador aptas para corrientes más profundas y veloces, que son usadas desde un cablecaril.

- Con un captador de **registro continuo** el objetivo es registrar los cambios a través del tiempo de la concen-



Figura 4. Captador de sedimentos en suspensión integrador en profundidad.

tración de sedimentos en suspensión. Sin embargo, no es posible medir directamente la concentración de un modo continuo. Las mediciones más típicas que se realizan, por lo tanto, se basan en cambios en la intensidad de la luz, de la conductividad eléctrica o del sonido, que luego se correlacionan con la concentración de sedimentos. (Esto es análogo al procedimiento que utiliza la curva altura-caudal para determinar la descarga líquida de un modo continuo.) El instrumento más utilizado generalmente es el **medidor de turbiedad** o "turbidímetro", cuyo funcionamiento se basa en la suposición que el agua con alta concentración de sedimentos es menos transparente. La turbiedad es una medida de esta propiedad óptica que inhibe la transmisión de la luz a través de la mezcla agua sedimento por los fenómenos de dispersión y absorción. Se mide mediante una célula fotoeléctrica. Los turbidímetros de atenuación miden la pérdida de intensidad de un rayo delgado paralelo que pasa a través de una longitud conocida en la mezcla agua-sedimento. Estos instrumentos suelen subestimar el efecto de atenuación. Los turbidímetros nefelométricos miden la luz dispersada en un cierto ángulo (habitualmente de 90° o 180°) con respecto al rayo emitido; son los dispositivos predilectos para medir turbiedad. Los registros resultantes necesitan ser calibrados contra valores medidos puntuales de concentración antes de que puedan ser transformados en un registro continuo (véase Figura 5). Es probable que esta calibración se modifique con el paso del tiempo, y debe tenerse en cuenta que la medición con célula fotoeléctrica es afectada por otros factores adicionales a la turbiedad.

• **Bomba automática:** este instrumento permite tomar muestras automáticamente en intervalos durante un período de tiempo; habitualmente se instala en una estación de aforo, cuando se desean obtener registros de largo plazo. El equipo bombea muestras de la mezcla agua-sedimento

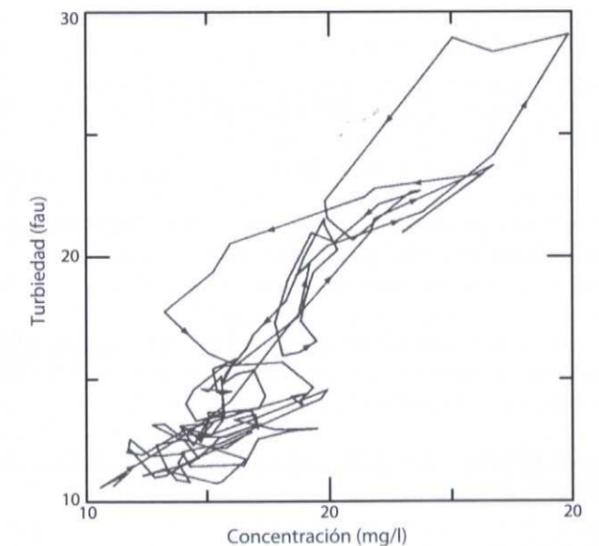


Figura 5. Relación entre turbiedad y concentración de sedimentos. Geebung Creek (79,6 ha), New South Wales, Australia, 23-30/10/85. Las flechas indican variación con el tiempo. Reproducida de: Gippel (1989).

desde el río a un conjunto de botellas (normalmente 24 para un único instrumento). La operación de bombeo puede programarse para que se produzca a intervalos de tiempo determinados, o en respuesta a cambios de la altura hidrométrica.

Oportunamente las botellas se retiran y reemplazan por otras vacías, y las muestras se llevan a laboratorio para su análisis. Como las muestras se captan en un punto, puede ser necesario calibrar el resultado contrastando con muestras obtenidas a lo ancho de la sección transversal para que se pueda aplicar un factor de corrección. Este equipo requiere de mantenimiento periódico, el cual incluye el reemplazo de la batería.

5.3. Análisis de laboratorio

Las muestras de la mezcla agua-sedimento se filtran, y el sedimento se seca. La concentración de sedimentos se calcula normalmente como la relación entre el peso seco de las partículas y el peso o volumen total de la mezcla. Las unidades estándar en que se expresa la concentración son mg l⁻¹ y ppm, relacionadas entre sí mediante la siguiente expresión:

$$C \text{ ppm} = C (\text{peso/volumen}) \times 10^6 / \rho (\text{peso/volumen})$$

Ecuación 1.

donde ρ es la densidad de la mezcla agua-sedimento expresada en las mismas unidades que la concentración (peso/volumen). Si el valor de la densidad es 1000 kg m⁻³, la concentración tiene el mismo valor en mg l⁻¹ y ppm.

En grandes ríos, en los que la concentración cambia poco a lo largo del día, una única muestra instantánea puede transformarse en descarga diaria de sedimentos en suspensión usando la expresión:

$$Q_{ss} = 0,0864 Q_d C_t$$

Ecuación 2.

donde Q_{ss} es caudal sólido en suspensión (toneladas día⁻¹), Q_d es el caudal medio diario (m³s⁻¹) y C_t es concentración de sedimentos en suspensión (mg l⁻¹).

También suelen realizarse otros análisis que incluyen distribución de tamaños de granos, velocidad de caída y composición mineralógica.

6. MEDICIÓN DEL TRANSPORTE DE LA CARGA DE FONDO

El objetivo es medir el peso o volumen de sedimento que pasa a través de una sección transversal de la corriente, por unidad de tiempo y por unidad de ancho. El peso requerido es habitualmente el peso seco, pero inicialmente

puede determinarse como peso seco, húmedo o peso sumergido. El volumen generalmente es el global (es decir, volumen de granos y poros), mientras que el peso se refiere efectivamente sólo al de las partículas.

Las mediciones directas del transporte de carga de fondo son tan dificultosas que no se ha convenido un procedimiento estándar. La medición precisa no es posible debido al movimiento de la arena en las formas de fondo, a la naturaleza episódica del movimiento de las partículas individuales (y en realidad del transporte mismo de sedimentos) y a la dificultad de captar todas las fracciones de tamaño presentes (arena, grava, guijarros) con el 100% de eficiencia; la eficiencia se define como la relación entre el transporte de carga de fondo medido y el verdadero. Las técnicas disponibles en general han sido diseñadas para los extremos o grueso (grava) o fino (arena) de los rangos de tamaño de partículas, pero no para mezclas de las mismas. Consecuentemente existen dificultades particulares en el muestreo de cargas de fondo, en las cuales las proporciones de arena, grava y guijarros varían constantemente. Además, la fracción arena puede moverse como carga de fondo bajo determinadas condiciones del escurrimiento, y como carga en suspensión bajo otras.

Los sitios de medición deben elegirse de tal modo que el sedimento obtenido sea representativo tanto de la cantidad como del tamaño de los materiales que son transportados a lo largo del cauce. Por ejemplo, un sitio de toma de muestras ubicado aguas abajo de una hoya no sería adecuado, dado que las partículas pueden depositarse. El mayor transporte de carga de fondo (y en muchas corrientes, su totalidad) se produce durante la ocurrencia de los máximos caudales, y por lo tanto requiere ser medido durante esos períodos.

Un esquema de muestreo adecuado (por ejemplo para construir curvas de descarga) puede insumir mucho tiempo y altos costos, y suele ser reemplazado por estimaciones más sencillas. Una de ellas consiste en estimar el transporte de carga de fondo como el 10% de la carga en suspensión en ríos de llanura con fondos de arena. Sin embargo ese valor podría ascender a 50% en ríos de montaña con lechos de material grueso.

6.1. Características de un buen captador

Un captador de carga de fondo ideal debería atrapar partículas grandes y pequeñas con la misma eficiencia sin alterar el patrón natural del flujo ni el movimiento de las partículas. Se considera satisfactoria una eficiencia de 60- 70%.

6.2 Tipos de captadores

Se utilizan estructuras fijas tanto como equipos portátiles.

Estructuras fijas

Estos captadores están limitados en su uso a pequeñas corrientes, debido al tipo de estructura involucrada.

•**Trampa de carga de fondo.** Consiste en una trinchera excavada en el fondo del cauce. El material atrapado en ella es removido y obtenido luego su peso total a intervalos apropiados de tiempo, por ejemplo después de cada tormenta, o bien a intervalos regulares. Proporciona un valor global de la producción de transporte de fondo para intervalos de tiempo específicos, pero no mide tasas instantáneas de transporte.

(Algunas versiones construidas en programas de estudio específicos de este dispositivo pueden brindar tasas de variación temporal, por ejemplo mediante la instalación de una membrana de presión sobre el fondo de la trampa, mediante la cual se miden los cambios de peso del material capturado.) La eficiencia es probablemente del 100% para todos los tamaños de partículas presentes, dependiendo de las dimensiones con que se diseñe la trampa.

•**Tube-vórtice.** Es un tubo o trinchera de sección circular dispuesto en diagonal sobre el fondo del cauce, que puede utilizarse para registrar en forma continua la tasa de transporte instantánea. El sedimento transportado como carga de fondo cae dentro del tubo y es trasladado a lo largo del mismo por la acción de un vórtice inducido por el flujo de agua sobre la parte superior del tubo; se descarga dentro de un área de trabajo adyacente prevista para la medición. La eficiencia de captura es de 100% para arenas gruesas y partículas mayores para todos los escurrimientos; también puede ser del orden de 100% para arenas medias y finas, en flujos menores.

•**Acústico.** Es un hidrófono utilizado para medir el transporte de carga de fondo a partir del sonido o vibración producidos por el movimiento de las partículas. Estos dispositivos pueden registrar el sonido que producen las partículas al moverse a lo largo del fondo

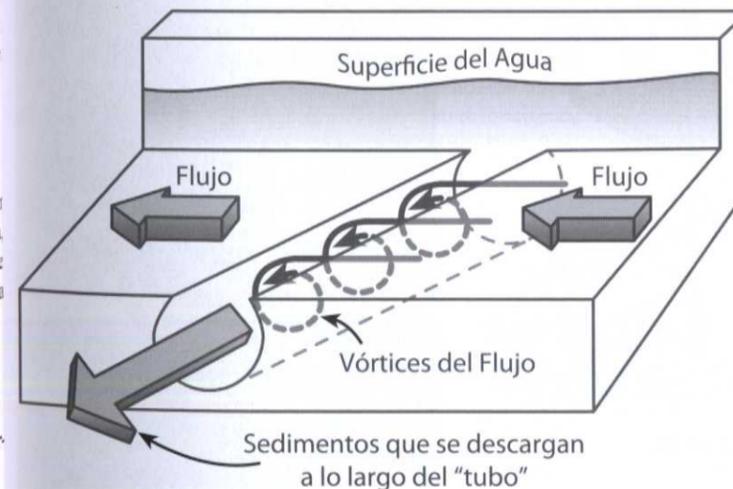


Figura 6 Diseño de un captador de sedimentos de tipo tubo-vórtice. Reproducida de Bathurst (1987).

del cauce (para estos casos el sistema puede ser portátil). Alternativamente pueden conectarse a un plato metálico ubicado sobre el fondo, y registrar las vibraciones causadas por los granos de sedimento que pasan por encima del plato. El método mide la incidencia e intensidad del transporte de fondo, pero las señales emitidas deben calibrarse mediante comparación con mediciones, si se pretende que proporcionen por sí mismas la tasa de transporte. El uso de los dispositivos acústicos se limita únicamente a fines de investigación.

Equipos portátiles

Son cajas o canastas que se bajan hasta tocar el fondo para coleccionar en su interior una muestra de sedimentos a lo largo de un período corto de tiempo. Generalmente poseen una boquilla de entrada y un recipiente permeable - similar a una bolsa confeccionada en malla- para retener el sedimento. Pueden ser operados desde puentes y cablecarriles o por vadeo, pero son difíciles de utilizar en corrientes altas. Proporcionan las tasas de transporte instantáneas y las muestras obtenidas se pueden analizar para obtener la distribución de tamaños de las partículas que las constituyen. Sus características y aplicaciones se detallan a continuación.

- El captador de sedimentos no debe perturbar las condiciones del flujo. Hay un peligro, dado que el dispositivo de muestreo incrementa la resistencia al flujo a su alrededor, de que la presión aumente y la velocidad de entrada de la mezcla agua-sedimento disminuya, ocasionando una acumulación del material transportado en el frente del equipo y provocando, por lo tanto, la toma de una muestra no representativa. Para evitar este efecto, la velocidad de entrada a través de la boquilla debe ser igual a la velocidad de la corriente. Esto se logra mediante una divergencia de las paredes del captador hacia su parte posterior, lo cual justifica su denominación como captador por diferencia de presiones.

- El dispositivo deberá estar nivelado con el lecho, de modo de evitar que se produzca socavación inferior o que la boquilla se entierre en el fondo.
- El tiempo de muestreo deberá ser suficientemente largo como para considerar las fluctuaciones espaciales y temporales de la carga de fondo. A lo ancho de la sección, se debe tomar un cierto número de muestras a intervalos determinados, para obtener el transporte de carga de fondo total que pasa a través de ella.
- La posición en que se coloca el equipo deber ser cuidadosamente tenida en cuenta para el caso de lechos de arena que presentan formas de fondo en movimiento.
- El tamaño de la boquilla establece el

límite para el máximo diámetro de partícula que podrá ser captada. Los granos de tamaño menor que la abertura de la malla pueden no ser retenidos. El atascamiento de las aberturas de la malla ocasionada por partículas más pequeñas o materiales orgánicos puede reducir la eficiencia de atrape.

•En caso de combinar la medición de carga de fondo con la de carga en suspensión para obtener la carga total, deberá tenerse la precaución de no superponer los

dominios de muestreo (conocido como problema de la captura doble). Las muestras necesarias se deberán obtener de dominios complementarios (véase Figura 7).

Un ejemplo de captador por diferencia de presión que está recibiendo creciente atención es el captador Helley-Smith (véase Figura 8). Posee mayor eficiencia que el tubo-vórtice para los tamaños más finos de partículas.

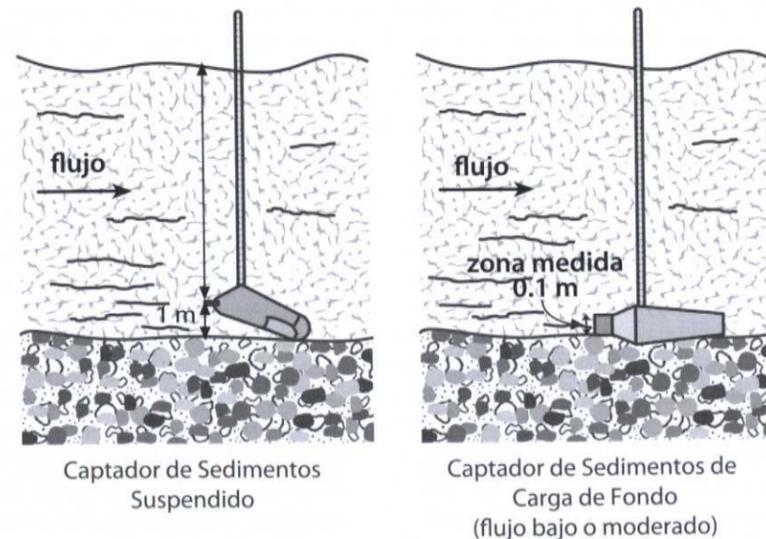


Figura 7. Ejemplo de dominios de muestreo complementarios de carga en suspensión y de fondo. Reproducida de USDA (1982).

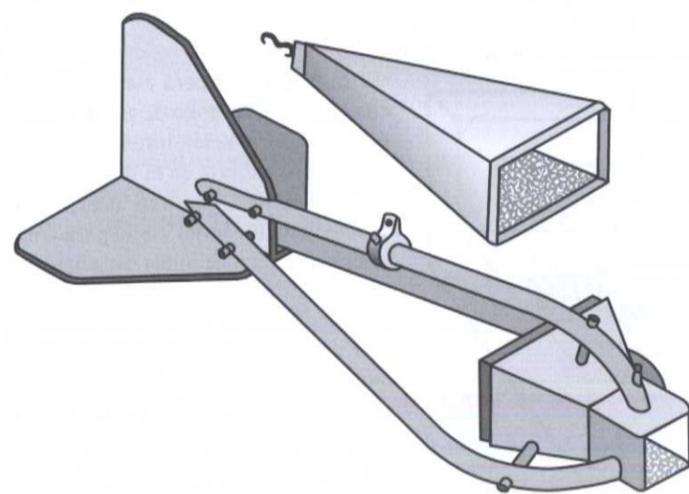


Figura 8. Captador Helley-Smith de carga de fondo. Reproducida de USDA (1982).

Figura 9. Captador Helley-Smith de carga de fondo en uso.



- 1 Las muestras se toman en un número de tres a diez puntos para cada sección transversal. La separación en dirección lateral puede variar y debe disminuir en zonas de transporte mayor. El tiempo de operación usualmente es el mismo para todos los puntos de toma de muestras.
- 2 De cada muestra se puede obtener el peso húmedo en campo o el peso seco en laboratorio.
- 3 El caudal de la carga de fondo por unidad de ancho de la corriente Q_{bl} se calcula en cada punto de medición como:

$$Q_{bl} = M_i / w t$$

M_i es el peso de muestra en el punto i , w es el ancho de la boquilla y t es el tiempo de toma de muestra. Se asume que cada medición representa el ancho de la respectiva subsección (análogamente a los métodos de área-velocidad para el cálculo de caudal líquido). Por lo tanto, el caudal de carga de fondo para la subsección se obtiene multiplicando Q_{bl} por el ancho de la subsección. El caudal total de carga de fondo es la suma de los valores parciales de las subsecciones o fajas, expresado como peso por unidad de tiempo.

Ecuación 3.

Toma de muestras con un equipo portátil

Técnica para la toma de muestras con un captador Helley-Smith.

7. MEDICIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE SEDIMENTOS DEL LECHO

La distribución de tamaños de sedimentos del lecho se requiere para el cálculo de la resistencia al flujo, transporte de sedimentos, desarrollo de formas de fondo, absorción de contaminantes, entre otras variables de interés. Se utilizan diferentes técnicas de medición para los distintos tipos de sedimentos.

7.1 Tipos de muestras

Para arenas, limos y arcillas, se toman muestras a granel, por ejemplo mediante dispositivos tipo draga con cucharas. Esta técnica se puede aplicar tanto en aguas profundas como en depósitos expuestos al aire. La distribución de tamaños de la fracción arena se obtiene por tamizado, midiendo el peso de material retenido por cada tamiz representativo de un intervalo de clase de tamaños. Se requieren técnicas especiales para determinar la distribución de tamaños de sedimentos cohesivos, limos y arcillas.

En el caso de capas superficiales de gravas, guijarros y cantos rodados, la muestra a granel equivalente al caso anterior suele tornarse demasiado grande para ser manejable. Debido a ello la muestra del material constitutivo del lecho se logra sobre la base de una grilla (la técnica Wolman), a partir de la cual se mide el diámetro intermedio de cada partícula de la muestra, y la distribución de tamaños se obtiene como el número de partículas que caen dentro de cada intervalo de clase de diámetros considerados. Cada muestra debe estar constituida por un mínimo de 100 clastos; se aplican diversas fórmulas para

establecer el error estadístico de la muestra. Esta técnica puede utilizarse en aguas poco profundas y en depósitos de sedimentos expuestos al aire.

Las gravas en capas subsuperficiales pueden ser obtenidas con un dispositivo de muestra congelada ("freeze-core"). Con este equipo se bombea dióxido de carbono líquido a través de un conjunto de cañerías dentro del paquete de gravas. El gas expansible enfría la cañería y congela el agua que ocupa los poros de la capa de gravas, generando una masa sólida de sedimento que puede ser removida del sitio de toma. La muestra tiende a ser pequeña, no mantiene fácilmente partículas grandes (como guijarros) y puede estar sesgada hacia los mayores tamaños. La técnica es útil en aguas poco profundas y en depósitos de sedimentos expuestos al aire.

Las dificultades del muestreo de los lechos de los cauces compuestos por un amplio rango de tamaños de partículas (arenas, gravas, cantos rodados), que pueden variar espacialmente y con la profundidad de acuerdo al ambiente deposicional, y de la operatoria debajo del agua, justifican que se utilicen diferentes técnicas en distintos puntos de toma de muestra, e incluso en el mismo sitio. En consecuencia, la comparación cuantitativa de diversos conjuntos de datos de distribuciones de tamaños debe realizarse con sumo cuidado.

7.2 Análisis de laboratorio

Los datos de distribución de tamaños deben analizarse a partir de propiedades estadísticas como la media, mediana, valor modal y asimetría. Se pueden representar gráficamente bajo la forma de diagramas acumulativos porcentuales, que permitan obtener tamaños individuales asociados a un determinado porcentaje acumulado. Como ejemplo, las fórmulas para estimar resistencia al escurrimiento para fondos de grava a menudo usan D84, que

es el tamaño del diámetro intermedio de gravas para el cual el 84% del material presente en la muestra es más fino (véase Figura 10).

8. EL PRINCIPIO DE LA CURVA

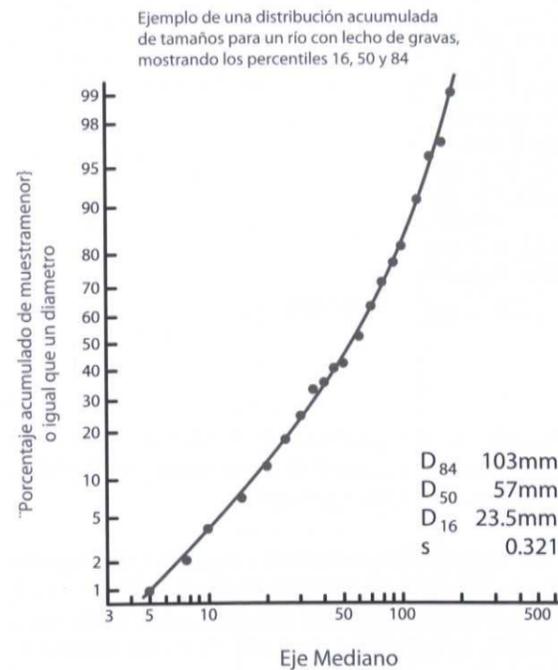


Figura 10. Ejemplo de una distribución acumulada de tamaños para un río con lecho de gravas, mostrando los percentiles 16, 50 y 84.

DE DESCARGA DE SEDIMENTOS

La producción de sedimentos es la cantidad de sedimentos que llega a un punto del río, procedente de la cuenca aguas arriba. Se mide en t año⁻¹ o, como producción de sedimentos específica, en t km⁻²año⁻¹. Ella puede determinarse por:

- **medición directa** del caudal sedimentario durante un período de años;
- **estudio de la sedimentación de un reservorio** llevado a cabo para estimar la cantidad de sedimento que se ha acumulado desde el primer llenado del embalse (o bien desde la última vez en que se lo cuantificó). La Tabla 2 muestra ejemplos del Reino Unido.

Sin embargo, habitualmente no es posible medir la descarga de sedimentos sobre una base continua durante largos períodos de tiempo. Las autoridades responsables del control fluvial normalmente toman muestras con intervalos semanales, o incluso menos frecuentemente, con lo cual es probable que se pierda información de períodos importantes con altos valores de transporte de sedimentos, durante la ocurrencia de los eventos de crecida. El estudio de la sedimentación en reservorios puede desarrollarse sólo en aquellos sitios en que éstos ya han sido construidos. Es por ello que en muchas ocasiones los accesos enunciados no pueden aplicarse.

Una alternativa es derivar y aplicar la **curva de descarga de sedimentos**. Con ella se relaciona generalmente la concentración de sedimentos C con el caudal líquido Q,

Tabla 2. Estimaciones de producción de sedimento a largo plazo obtenidas de estudios de sedimentación en reservorios en el Reino Unido. Reproducido de Walling & Webb (1981), con datos de fuentes diversas.

Río	Reservorio	Área de cuenca km ²	Producción de sedimentos t km ⁻² año ⁻¹
Rede	Catcleugh	40,0	43,1
Bradgate	Cropston	17,8	45,6
Loxley	Strines	7,4	49,7
North Esk	North Esk	7,0	26,0
North Tyne	Hopes	5,0	25,0
Churnet	Deep Hayes	9,8	6,7
Wyre	Abbeystead	47,3	34,8

a partir de mediciones disponibles. La relación obtenida se puede expresar gráficamente en diagramas con ambos ejes logarítmicos, y se cuantifica habitualmente como una relación potencial de la forma:

$$C = a Q^b$$

Ecuación 4.

donde a y b son el coeficiente y el exponente, respectiva-

$$\text{Concentración de una muestra de sedimentos} = \frac{\text{Peso o volumen de sedimentos}}{\text{Peso o volumen de la mezcla agua - sedimentos}}$$

La concentración comúnmente se expresa como mg l⁻¹ o como partes por millón (ppm).

$$\text{Descarga de sedimentos} = \text{Concentración} \times \text{Caudal líquido}$$

mente, derivados empíricamente. El valor típico de b cae en el rango 1,5-3. Pueden obtenerse relaciones de este tipo para concentraciones de la carga suspendida, de la carga de fondo o de la carga total, pero las más comunes se deducen para la carga en suspensión.

Nótese que la curva de descarga se obtiene para valores de concentración, no de descarga de sedimentos. Como esta última surge de multiplicar concentración por el res-

pectivo valor de caudal líquido, relacionar descarga de sedimentos con descarga líquida introduce un grado de correlación espuria, produciendo un ajuste aparente mejor que el que se logra con el conjunto original de datos.

9. CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

La aplicación de la relación de descarga a un registro continuo de caudal líquido para un período dado produce un registro continuo de valores de concentración. La combinación de este último con el registro disponible de caudales líquidos, proporciona un conjunto de valores de descarga de sedimentos variable en el tiempo. Su integración para el período de tiempo brinda la producción de sedimentos:

$$\text{Producción de sedimentos} = \int_0^T \frac{Q_s dt}{T \times \text{Área de cuenca}}$$

Ecuación 5.

donde Q_{ss} es la descarga de sedimentos variable en el tiempo, T es el período y t es el tiempo.

Una técnica alternativa resulta de combinar la relación obtenida para la descarga de sedimentos con una **curva de duración de caudales líquidos**, como se ilustra en el ejemplo del Río Chaudière, Canadá (véanse Tabla 3 y Figuras 11 y 12). La curva de duración de caudales ha sido expresada en intervalos discretos en la segunda y cuarta columnas de la tabla. Nótese que los intervalos porcentuales de tiempo seleccionados son más cortos a medida que el caudal se incrementa. La curva de descarga

Tabla 3. Producción de sedimentos a largo plazo del Río Chaudière a partir del método de duración de caudales y de la curva de descarga de sedimentos. Reproducida de Julien (1998).

NOTAS: Las columnas 2 y 4 definen la curva de duración de caudales. Las columnas 4 y 5 definen la curva de descarga de sedimentos. El producto de las columnas 3 y 4 figura en la columna 6.

A) La concentración C en mg l⁻¹ se calcula a partir del caudal Q en m³s⁻¹, como: C = 0,04 Q^{1,3}

B) La producción anual de sedimentos en t año⁻¹ se calcula como:

$$Q_s \times p = 31,54 \times C \times Q \times p$$

con C en mg l⁻¹ y Q en m³s⁻¹

1	2	3	4	5	6	7
Intervalos de tiempo (%)	Punto medio del intervalo (%)	Intervalo (%)	Caudal Q (m ³ s ⁻¹)	Concentración C (mg l ⁻¹) ^A	Q x p (m ³ s ⁻¹)	Carga de sedimentos Q _s x p (t año ⁻¹) ^B
0,00-0,02	0,01	0,02	1 643	605,7	0,329	6 276
0,02-0,1	0,06	0,08	1 473	525,5	1,178	19 528
0,1-0,5	0,30	0,40	1 218	410,5	4,871	63 066
0,5-1,5	1,00	1,00	935	291,0	9,346	85 771
1,5-5,0	3,25	3,50	595	161,7	20,816	106 152
5-15	10,0	10,0	301	66,8	30,133	63 493
15-25	20,0	10,0	155	28,2	15,506	13 773
25-35	30,0	10,0	99	15,6	9,867	4 870
35-45	40,0	10,0	69	9,8	6,896	2 137
45-55	50,0	10,0	52	6,8	5,208	1 120
55-65	60,0	10,0	39	4,7	3,894	574
65-75	70,0	10,0	29	3,2	2,917	295
75-85	80,0	10,0	22	2,2	2,161	148
85-95	90,0	10,0	15	1,4	1,549	69
95-98,5	96,75	3,5	11	0,9	0,394	12
						367 283

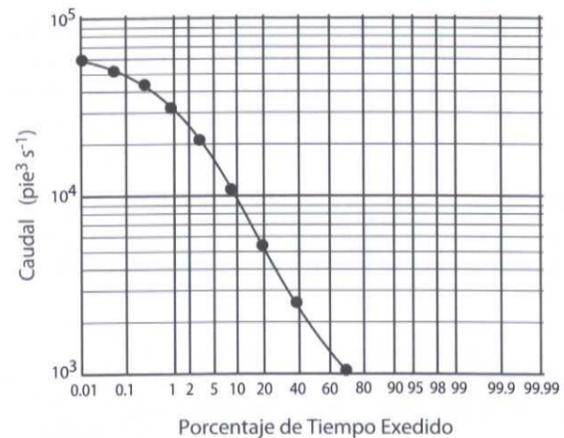


Figura 11. Curva de duración de caudales del Río Chaudière. Reproducida de Julien (1998).

de sedimentos se utiliza para determinar la concentración en la quinta columna. La carga de sedimentos total anual se obtiene mediante la suma de todos los intervalos de la curva de duración de caudales.

10. FUENTES DE ERROR

Los gráficos de los valores de concentración de sedimentos relacionados con los de caudal líquido habitualmente muestran una dispersión considerable (ver Figura 13 como ejemplo). Las relaciones de descarga son, por tanto, aproximadas. Las razones para tal dispersión incluyen:

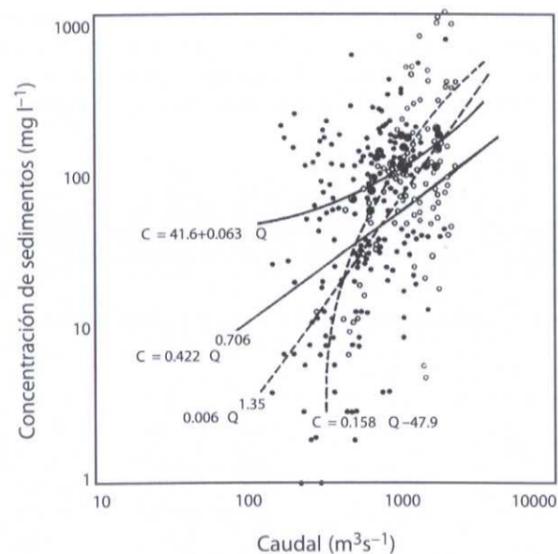


Figura 13. Curvas de descarga de sedimentos para el río Alice en Konkonda, Papua Nueva Guinea. Como ocurren diferencias estacionales en las relaciones concentración-caudal, la dispersión de los puntos es tal que virtualmente se podría ajustar cualquier ecuación de regresión. Reproducida de Pickup (1988).

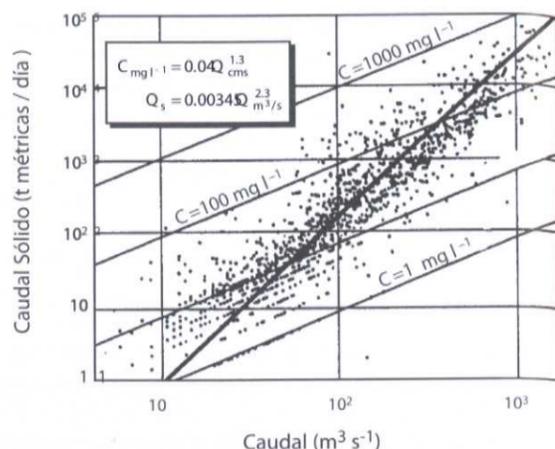


Figura 12. Curva de descarga de sedimentos del Río Chaudière. Reproducida de Julien (1998).

10.1 Origen del sedimento

La carga de sedimento en suspensión incluye la carga de lavado y una parte de la carga de material defondo, pero sólo esta última es probable que varíe estrechamente con el caudal líquido del río.

La carga de lavado puede variar ampliamente para un mismo valor de caudal, de acuerdo a los mecanismos de suministro de sedimentos y las fuentes de procedencia del material (tales como colapso de márgenes, escurrimiento por laderas de montañas, o aportes por deslizamientos de taludes). Algunas partes de la cuenca pueden ser fuentes de provisión más prolíficas que otras, por lo que el ingreso de sedimentos al cauce puede variar en función de la distribución superficial de las precipitaciones y de la escorrenría, aún cuando éstas últimas, en definitiva, puedan generar el mismo caudal líquido.

10.2 Variación durante un evento de crecida

Los caudales líquido y de sedimentos no siempre alcanzan sus valores pico simultáneamente, produciendo un efecto

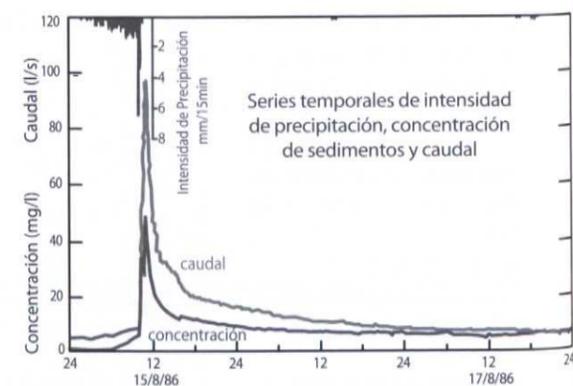


Figura 14. Evento de tormenta en Geebung Creek, New South Wales, Australia, 15 de agosto de 1986. Reproducida de Gippel (1989).

de histéresis (ver Figura 14). Los picos de la descarga de sedimentos posteriores al de caudal líquido, sugieren la puesta en movimiento de material del lecho que sigue a

la ruptura de una capa acorazada ocasionada por el caudal máximo, o el colapso de márgenes saturadas cuando los niveles de agua bajan (Figura 15 a). La aparición de los

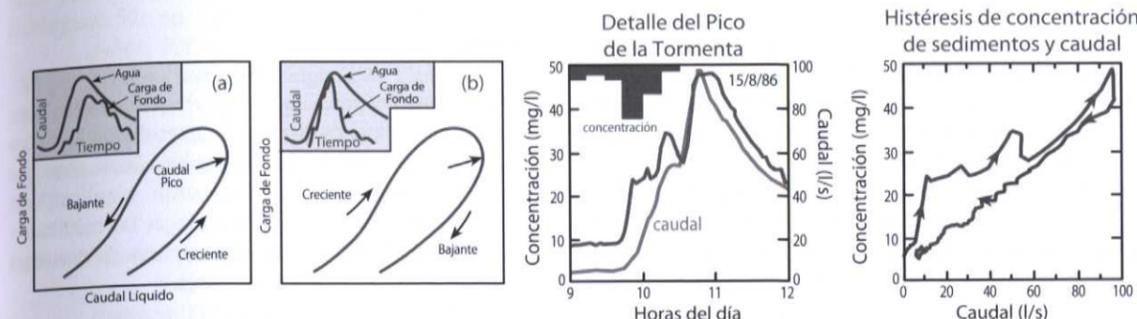


Figura 15 Variación del transporte de carga de fondo con el caudal líquido a través del hidrograma de una crecida. (a) Cuando el sedimento está disponible durante la rama de bajante. (b) Cuando las fuentes de sedimento se agotan durante la rama de crecida. Los hidrogramas de caudal y de carga de fondo están intercalados. Reproducida de Bathurst (1987).

picos de la descarga de sedimentos antes de la del caudal líquido indica que los abastecimientos de sedimento acumulado previos a la tormenta son removidos en la rama

ascendente dejando poco material para transportar en la rama de bajante (Figura 15 b).



Figura 16. Variación en la concentración de sedimentos en suspensión durante una serie de hidrogramas de tormentas en el río Dart, Devon, Reino Unido. Reproducida de Walling & Webb (1981).

10.3 Eventos de escurrimiento con picos múltiples

Dos eventos de crecida sucesivos de similar magnitud pueden transportar diferentes cargas de sedimento, debido a los efectos de suministro y agotamiento. El primer pico puede agotar la fuente de sedimentos, por lo que habrá menor cantidad disponible para ser transportada por el segundo pico (ver como ejemplo la Figura 16).

La erosión producida en laderas montañosas durante el primer evento puede generar sedimentos que no alcanzan el cauce hasta el segundo evento.

de la primavera y del verano trasladarán luego cargas de sedimento inferiores para un caudal dado, debido a que las fuentes de provisión de sedimentos ya están agotadas.

En una cuenca con áreas significativas destinadas al uso agrícola, la presencia de suelo desnudo (arado) en ciertos períodos del año podría resultar en cargas de sedimentos relativamente altas para un caudal determinado, mientras que en otras épocas del mismo año se registran cargas inferiores. Un ejemplo se muestra en la Figura 17.

10.4 Variaciones estacionales

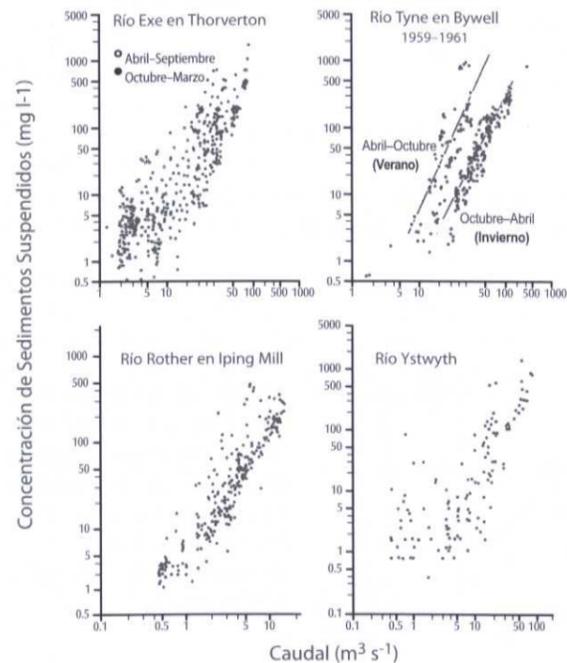
En ríos con régimen de deshielo, las crecidas tempranas propias de la primavera remueven las fuentes de sedimento acumuladas durante el invierno. Las crecidas tardías

11. USO DE LAS CURVAS DE DESCARGA DE SEDIMENTOS

Las curvas de descarga de sedimentos deben ser utilizadas con precaución debido a la dispersión asociada con ellas. La suposición implícita es que puede establecerse una

relación estable entre concentraciones y caudales líquidos la que, a pesar de la dispersión que posee, permitirá determinar la producción media de sedimentos sobre la base de los registros de caudales.

Las curvas de descarga de sedimentos no proporcionan estimaciones exactas de la concentración instantánea. Sin embargo, cuando se las aplica para estimar la producción de sedimentos media anual (o incluso media mensual), los errores en la relación tenderán a compensarse, y el resultado obtenido será razonablemente satisfactorio si se utiliza un registro de datos suficientemente extenso. Además, brindarán una mayor precisión si son aplicadas a cuencas pequeñas y relativamente homogéneas.



Para un único sitio pueden llegar a ser necesarias múltiples relaciones para distintas estaciones o condiciones (por ejemplo, estados de crecida y de estiaje, verano, invierno, caudales bajos o elevados).

RESUMEN

Este documento proporciona el conocimiento básico para llevar a cabo mediciones directas de carga de fondo, carga de sedimentos en suspensión, y distribución de tamaño de sedimentos del lecho; para construir y aplicar una curva de descarga de sedimentos y juzgar los resultados de mediciones y la aplicación de una curva de descarga en el contexto de sus probables errores.

Figura 17. Relaciones concentración de sedimentos en suspensión-caudal para cuatro ríos británicos. Reproducida de Walling & Webb (1981).

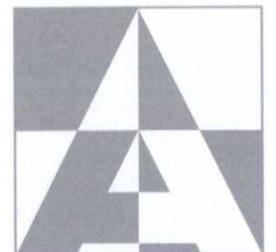
REFERENCIAS

- Gordon, N.D., McMahon, T.A. & Finlayson, B.L. (1992) Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists. 526 pp. Chichester, UK: Wiley.
- Julien, P.Y. (1998) Erosion and Sedimentation. 280 pp. (paperback). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Morris, G.L. & Fan, J. (1998) Reservoir Sedimentation Handbook. Approx. 1000 pp. New York: McGraw-Hill.

Referencias adicionales citadas

- Bathurst, J.C. (1987) 'Measuring and modelling bedload transport in channels with coarse bed materials', in River Channels: Environment and Processes. K.

- Richards (ed.) pp 272-294. Oxford, UK: Blackwell.
- Gippel, C.J. (1989) The use of turbidity instruments to measure stream water suspended sediment concentration. Monograph Series No. 4, 204 pp. Department of Geography and Oceanography, University College, Australian
- Defence Force Academy, Canberra. Pickup, G. (1988) 'Hydrology and sediment models', in Modelling Geomorphological Systems. M.G. Anderson (ed.), pp 153-215. Chichester, UK: Wiley.
- USDA (1982) Sediment transport, water quality and changing bed conditions, Tucannon River, Washington. US Department of Agriculture, Soil
- Conservation Service, Spokane, Wash., USA.
- Walling, D.E. & Webb, B.W. (1981) 'Water quality', in British Rivers. J. Lewin (ed.) pp 126-169. London: Allen & Unwin.



Adecuación de las Actuaciones de R. H-F en Cuencas de Diferentes Ambitos Geográficos

J. Á. Mintegui (1), M. Miranda (2),
J. C. Robredo (1), J. Fallas (2),
C. López-Leiva (1), C. Valverde (2)
y J. García-Viñas (1)

(1) Universidad Politécnica de Madrid; E. T. S.
Ingenieros de Montes;
Departamento Ingeniería Forestal;
Unidad de Hidráulica e Hidrología;
Ciudad Universitaria s/n, 28040 MADRID

(2) Centro Internacional en Política Económica
para el Desarrollo Sostenible (CINPE),
Fundación Universidad Nacional de Costa Rica,
HEREDIA, Costa Rica

RESUMEN

La restauración hidrológico-forestal de cuencas hidrográficas surge a finales del siglo XIX en los países montañosos de Europa meridional, ante el incremento e intensidad que adquirirían los efectos de los fenómenos geo-torrenciales en sus cuencas de montaña, así como ante el aumento del número de aludes en invierno. Los ingenieros encargados de la corrección de los torrentes de montaña se percataron muy pronto que, si se querían consolidar los trabajos hidráulicos efectuados en los torrentes, necesitaban restaurar sus cuencas vertientes.

A lo largo del siglo XX el concepto de restauración de cuencas hidrográficas experimentó nuevas dimensiones, como la de protección de las cuencas alimentadoras de embalses o la lucha contra la desertificación. En las últimas décadas las ideas y técnicas de la ordenación y restauración de cuencas se han propagado por todo el mundo y han tenido un especial calado en América Latina.

La presente comunicación compara dos pequeñas cuencas hidrográficas, la cuenca vertiente a la rambla del Aljibe en Almería (España) y la cuenca del río Pejibaye en el cantón de Pérez Zeledón (Costa Rica), en las que trata de mostrar el significado que para cada una de ellas la aplicación de los criterios y técnicas de ordenación y restauración de cuencas, admitiendo que los objetivos siguen siendo los de siempre, la protección de las cuencas ante los fenómenos geo-torrenciales que desencadenan en ellas los eventos meteorológicos excepcionales y el aprovechamiento sostenido de las mismas. Estas experiencias forman parte del Proyecto INCO: Evidence-Based Policy for Integrated Control of Forested River catchments in extreme rainfall and Snowmelt (EPIC FORCE) financiado por la Unión Europea y liderado por la University of Newcastle (U.K.).



INTRODUCCIÓN: OBJETIVOS FUNDAMENTALES DE LA ORDENACIÓN Y RESTAURACIÓN EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA ANTE DIFERENTES ESCENARIOS ESPACIO-TEMPORALES

Los dos objetivos fundamentales en la ordenación y restauración de una cuenca hidrográfica son:

1. La protección de la cuenca vertiente, para amortiguar los efectos geo-torrencales que la puedan causar los eventos torrenciales tanto ordinarios como extraordinarios.
2. El mejor aprovechamiento de los recursos agua y suelo en la cuenca hidrográfica; para lo que se actúa tanto en el ámbito de las superficies vertientes, como en los cauces de evacuación. En las primeras, planificando los usos más adecuados del suelo en sus diferentes zonas, con la intención de influir en el ciclo del agua para tratar de regular sus procesos y en caso de situaciones extremas incluso de laminarlos. En los segundos, aunque la finalidad de las acciones proyectadas sea esencialmente la misma que la que se persigue con la restauración H & F de la cuenca, utilizando medios diferentes, tanto de ingeniería hidráulica civil como de bioingeniería o ingeniería paisajística.

En cualquier caso, el previsible comportamiento de la cuenca hidrográfica se debe analizar a largo plazo y para las dos situaciones que en la misma se presentan:

1. Cuando le inciden precipitaciones torrenciales, especialmente eventos extraordinarios.
2. Durante los periodos que transcurren entre precipitaciones torrenciales.

Resulta evidente que la solución técnica para conseguir la mejor protección posible para la cuenca hidrográfica ante un evento torrencial extraordinario, se encuentra en una adecuada combinación de medidas hidráulicas de obra civil (encargadas de evacuar el flujo sobrante de la cuenca en esos momentos) y de mantenimiento de unas cubiertas arboladas permanentes en los lugares estratégicos de la cuenca (áreas dominantes de fuertes pendientes), para que el terreno resista en ellos ante las tracciones de las fuertes escorrentías que tienen lugar en los mismos en los momentos del evento, evitando así la incorporación de un importante caudal sólido al flujo, que añade problemas a la evacuación de la corriente fuera de la cuenca.

Ante las restantes precipitaciones torrenciales, los efectos del bosque y de las demás cubiertas vegetales mecánicamente actúan basándose en los mismos principios y sus efectos pueden resultar incluso más convincentes. La cuestión puede diferir para los periodos que transcurren entre precipitaciones torrenciales, sobre todo cuando éstos se prolongan y en los mismos tampoco se produ-

gan las lluvias normales, es decir, durante los periodos de sequía. En estos momentos los aspectos fisiológicos de la vegetación pueden estar incidiendo sobre los recursos hídricos de la cuenca vertiente; pero las características mecánicas de la vegetación en relación con la protección al suelo pueden no alterarse, siempre y cuando ésta conserve su estructura tanto aérea como radical. Queda sin embargo por responder la siguiente cuestión: ¿Tiene sentido cuestionar el tipo de cobertura que debe tener una determinada zona en función de sus necesidades hídricas, en especial del arbolado, cuando se plantea la ordenación y restauración de una cuenca hidrográfica?

La respuesta, desde el punto de vista de conseguir la mejor protección del suelo en la cuenca y la mayor estabilidad para sus laderas, es evidentemente no; por razones mecánicas y climáticas. Pero si la cuestión se plantea en el sentido de resolver algunas necesidades para la población que habita en la cuenca, entra en el ámbito de lo discutible. ¿Cuál sería el límite del que no se debe pasar? Pues lógicamente aquel en el que la cuenca puede entrar en un proceso de degradación prácticamente irreversible; porque no olvidemos que la vegetación natural de la cuenca es la que le corresponde por su clima; aunque tal situación sólo pueda existir en las cuencas vírgenes.

Pero los objetivos generales se deben matizar para cada cuenca dependiendo de su latitud, altitud y sobre todo del estado de conservación de su cubierta vegetal. En esta comunicación se analiza esta cuestión, utilizando dos pequeñas cuencas hidrográficas; la que alimenta la rambla del Aljibe (Almería, España) de 88,35 Km² y la que vierte al río Pejibaye hasta su confluencia con el río Águilas (Pérez Zeledón, Costa Rica) de 132,02 Km².

DESCRIPCIÓN GENERAL DE CADA UNA DE LAS DOS CUENCAS ANALIZADAS: ESTRATEGIAS A CONSIDERAR EN CADA SITUACIÓN

La cuenca alimentadora de la rambla del Aljibe está situada en el término municipal de Lubrín en la provincia de Almería, al sureste de España, entre los 2° 0,5' y los 2° 9' de longitud oeste y los 37° 11,5' y los 37° 18' de latitud norte. Tanto hidrológica como climáticamente se trata de una típica cuenca mediterránea de montaña. Su cota máxima es 1.070 m y la mínima 363 m. Presenta una pendiente media del 26 % y una morfología óvalo-redonda. Sus suelos, fuertemente condicionados por la litología y por sus pendientes, son vulnerables a la erosión y se encuentran muy erosionados. Es frecuente la aparición en la zona de fuertes aguaceros en otoño, normalmente vinculados al efecto de la gota fría. Finalmente la cubierta vegetal de la cuenca se encuentra en general muy degradada, debido a un inadecuado uso del suelo en el pasado; pero el área en cuestión presenta una capacidad bioclimática suficiente como para permitir un estrato arbóreo en amplias zonas de la cuenca; que actualmente se reduce a relictos de bosque autóctono en un 3 % de su superficie total.

La cuenca vertiente al río Pejibaye se encuentra situada en el cantón de Pérez Zeledón, al suroeste de Costa Rica, entre los 83° 33' y los 83° 42' de longitud oeste y los 9° 9' y los 9° 13' de latitud norte. Tanto hidrológica como climáticamente se trata de una típica cuenca tropical de montaña, con alternancia de periodos estacionales lluvioso y seco. Su cota máxima es 1.176 m y la mínima 375 m. Presenta una pendiente media del 27 % y una morfología óvalo-redonda. Sus suelos son todos ellos profundos, ácidos y bien drenados; los situados en la zona norte de la cuenca son de textura fina y poco permeables, mientras que los situados al sur muestran una textura moderadamente fina, son menos profundos y más permeables que los situados al norte; la vulnerabilidad de ambos tipos de suelos a la erosión es alta y en terrenos de elevadas pendientes son frecuentes los deslizamientos superficiales, coincidiendo con los fuertes aguaceros torrenciales de los periodos lluviosos o con los eventos torrenciales extraordinarios que tienen lugar en la zona. En cuanto al uso del suelo, cabe comentar que hace cincuenta años prácticamente toda la cuenca estaba cubierta por un bosque tropical de montaña, que fue desmontado por sus actuales o anteriores propietarios para dedicarlo a cultivos y pastizales. En la actualidad el 50 % de la cuenca lo ocupan los cultivos, el 45 % los pastizales permanentes y sólo un 5 % se ha reservado al bosque, prácticamente todo él secundario. Aunque la cuenca muestra en algunas de sus zonas síntomas de problemas erosivos, especialmente deslizamientos superficiales; su capacidad bioclimática es muy elevada, hasta el punto que la mayoría de los terrenos dedicados a cultivos y pastizales pueden retornar de nuevo a un bosque tropical secundario, simplemente con abandonar en ellos los actuales aprovechamientos. Un bosque secundario, aunque desde el punto de vista de la biodiversidad no se identifica con el primario, en el aspecto hidrológico se comporta de manera semejante.

En ambos casos se trata de dos pequeñas cuencas hidrográficas, cuyo futuro depende del uso al que se dediquen sus suelos. En este contexto, el reto no se encuentra en abandonarlas a las fuerzas de la naturaleza, que a tenor de las manifestaciones más primarias, mientras que la cuenca de la rambla del Aljibe no conseguiría recuperar su cubierta original de bosque mediterráneo por sus propios medios o requeriría un periodo muy dilatado de años para conseguirlo, dado su nivel de degradación ecológica actual; la mayor parte de la cuenca del río Pejibaye recuperaría en unos treinta años el bosque tropical. Sin embargo, este planteamiento no supone la solución en ningún caso, sobre todo para los algo más de 10.000 habitantes que pueblan la cuenca del Pejibaye y viven de sus recursos; población que comprende todas las clases de edad y que supera en más del doble a la de la cuenca de la rambla del Aljibe, que además se encuentra envejecida.

Ante situaciones tan diferentes, la planificación de las actuaciones en cada cuenca también debe reflejar estrategias diferentes; aunque se mantengan los objetivos iniciales

de protección de la cuenca ante eventos torrenciales y su aprovechamiento sustentable. En el primer caso, hay que regenerar en la cuenca su capacidad para recuperar su primitiva cubierta vegetal de bosque mediterráneo, efectuando repoblaciones en las áreas que potencialmente sean aptas y que los necesiten; en segundo, tratar por todos los medios que la cuenca no pierda su capacidad actual de regenerar el bosque tropical secundario; para que se pueda utilizarla cuando los problemas geo-torrenciales o las necesidades de conservación de suelos en la cuenca lo demanden.

FACTORES A CONSIDERAR EN LA ORDENACIÓN Y RESTAURACIÓN DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

Como paso previo a la redacción del proyecto de restauración hidrológico-forestal de la cuenca de la rambla del Aljibe, se elaboró su ordenación agro-hidrológica, es decir, se planificó el previsible efecto de las cubiertas vegetales en su régimen hidrológico y en la conservación de sus suelos. Para ello se consideraron los factores que aparecen en la Tabla 1, que resultan válidos también para la ordenación agro-hidrológica de la cuenca del río Pejibaye. A continuación en la Tabla 2 se muestra de forma resumida la ordenación agro-hidrológica de la cuenca de la rambla del Aljibe.

ACTUACIONES PARA RESTAURAR O IMPEDIR SU DEGRADACIÓN EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA DEPENDIENDO DE SU SITUACIÓN DE PARTIDA.

Tratándose de la cuenca de la rambla del Aljibe, tras su ordenación agro-hidrológica se proyectó su restauración hidrológico-forestal (1991), atendiendo a los objetivos habituales en este tipo de proyectos en las últimas décadas del siglo pasado: 1) El control de la erosión superficial del suelo, compatibilizando con el uso racional de los terrenos de la cuenca; 2) La regularización de las crecidas en su red de drenaje, así como el transporte de los sedimentos por las mismas y 3) El mejor aprovechamiento de sus recursos hídricos. Aunque en definitiva el verdadero objetivo del proyecto era la recuperación ecológica de la cuenca, como medida para su futura puesta en valor económico, para ello se proyectaron 4.806 ha de repoblación forestal (4.488 ha en áreas de monte y las restantes 314 ha en zonas de riberas) con diferentes tipos de preparación del suelo dependiendo de la pendiente del terreno (líneas de contorno; banquetas; ahoyado mecánico). Para la plantación en las áreas de monte se eligió como especie predominante el *Pinus halepensis* (autóctona, heliófila, xerófila y con un temperamento muy adaptado al clima mediterráneo), aunque en los rodales con mejor microclima se propuso el *Quercus ilex rotundifolia* o el *Ceratonia siliqua* (este último en las zonas más cálidas); para las riberas se eligió un conjunto de especies ripícolas con predominio de los géneros *Pópulus*, *Salix* y *Tamarix*.

Respecto de la cuenca del río Pejibaye se limitó a redactar la ordenación agro-hidrológica de su cuenca vertiente (2006); para ello, tras un estudio preliminar en gabinete a partir de la información disponible, se recorrió la cuenca para comprobar dicha información y completarla in situ.

En síntesis se efectuaron las operaciones siguientes:

- 1) La definición de los usos del suelo en la cuenca
- 2) La detección de los problemas erosivos relacionados con los usos del suelo en la cuenca.

Respecto de los usos del suelo se definieron los siguientes: a) Bosques secundarios; b) Pastizales con ganadería intensiva; c) Cafetales en sombra; d) Cultivos rotativos de frijol-maíz o de maíz-frijol y e) Otros cultivos como el tiquisque o el jengibre.

En relación con los problemas erosivos, se identificaron los siguientes: 1) Deslizamientos epiteliales del terreno en las áreas dominantes de la cuenca; 2) Erosiones lineales en las cunetas de los caminos y en las desviaciones de flujos de agua desde los mismos; 3) Los típicos problemas de erosión hídrica en los diferentes tipos de cultivos y finalmente 4) no se detectaron problemas en los cauces de los cursos principales que drenan la cuenca, que presentan estructuras típicas en step-pool, aunque se tiene información que con ocasión de eventos torrenciales extraordinarios se llenan de sedimentos finos procedentes de la erosión en la cuenca, lo que obliga a labores de drenaje. El bosque secundario cubre al suelo por completo a partir del segundo año y para los quince se comporta como el bosque primario desde el punto de vista hidrológico, aunque su biodiversidad sea inferior. A partir de los 30

años ambos bosques comienzan a identificarse según la información aportada por los habitantes de la cuenca. Los pastizales con ganadería intensiva protegen bien el suelo hasta pendientes del 30 % mientras se encuentren bien conservados e incluso se podría elevar el límite hasta el 40 %; pero en la cuenca del río Pejibaye se extienden hasta pendientes del 60 % y superiores, en los que ocasionalmente se observan deslizamientos superficiales producidos con ocasión de los eventos torrenciales.

Los cafetales en sombra emplean la variedad arábigo, una planta bastante alta que produce un café de calidad. Se cultivan bajo la sombra de especies arbóreas en dispersión adherada y sobre terrenos abancalados; además, estos cafetales generan abundante hojarasca que cubre al suelo. El café florece en mayo y se cosecha en noviembre, por lo que tapa al suelo en la época lluviosa y además sus raíces son muy ramificadas. Se asume que el comportamiento hidrológico y la capacidad de conservación del suelo de un cafetal en sombra es el adecuado en terrenos de hasta el 40 % de pendiente; pues la erosión de visu en estos cafetales es menor que en los pastizales a diente, en los que a veces se observan aspectos amacollados y senderos abiertos por el ganado; en cualquier caso, en los lindes del cafetal conviene reforzar las medidas de protección del suelo. Después del bosque secundario el cafetal de sombra constituye el estrato vegetal mejor acondicionado para la conservación del suelo en la cuenca del río Pejibaye.

La rotación del cultivo frijol-maíz o de maíz-frijol ha variado su modo de laboreo en los últimos años para asegurar la protección del suelo ante la erosión hídrica. En la actualidad no se queman los rastrojos de la cosecha anterior y en su lugar se introduce el ganado, para continuación emparejar el terreno con cuchillo (es decir, se

Tabla 1. Factores a considerar en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca.

Factores	Clasificación atendiendo a los factores considerados
Posición altitudinal en la cuenca	Áreas dominantes (cabeceras) Áreas dominadas (valles)
Cubierta vegetal	Estado actual de la vegetación Procedencia Vocación (forestal, agrícola, otros)
Morfología de la cuenca	Pendientes del terreno Orientación (solana, umbría)
Geología y grados de erosión	Áreas con erosiones superficiales Áreas con erosiones de fondo
Edafología	Tipos de suelos en las diferentes zonas de la cuenca
Modelos para estimar la protección del suelo	Índices de protección del suelo por la vegetación Aplicación de ecuaciones paramétricas USLE o RUSLE Otros modelos de erosión
Índices fitoclimáticos	Índices bio-climáticos Índices de potencialidad de la estación
Actuaciones en el territorio	En la cuenca vertiente (alternativas posibles y elección de la opción de proyecto) En los cauces (alternativas posibles y elección de la opción de proyecto)
Calificación de las diferentes zonas según el Proyecto	Zonas con actuaciones Zonas de recomendaciones Zonas sin actuaciones

Tabla 2. Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente a la rambla del Aljibe (Almería, España), 1991.

Altitud (m)	Cubierta vegetal		Pendiente p (%)	Tipos de suelo	Protección del suelo Aplicación USLE	Índices bio-climáticos (en UB unidades bio-climáticas)	Actuaciones en el territorio	
	Estado actual	Vocación						
Relictos del bosque primitivo en áreas dominantes > 600 Área dominante	Encinar (a veces aclarado)	Forestal	Cualquiera (lo normal elevada)	Suelos pardos profundos	Buena <10 t/ha·a	>2,5 UB	Mantener y mejorar el bosque de encina	
	Pinar aclarado			Rendzinas		>1,5 UB	Mantener y mejorar el bosque de pinar	
	Matorral serial	Forestal	p < 30	Suelos pardos jóvenes bastante profundos	Regular >10 t/ha·a	En general > 2,0 UB Áreas más soleadas del noreste > 1,0 UB	Repoblación Forestal Preparación del suelo: en cuencas de contorno. Plantación: <i>P. halepensis</i> y en zonas ecológicas especiales con <i>Q. ilex</i>	
				30<p<40	Rendzinas (en ocasiones Rankers de pendiente)		Escasa >10 t/ha·a	Repoblación Forestal Preparación del suelo: en banquetas. Plantación: <i>P. halepensis</i>
				p > 40	Cualquiera (lo normal p > 30)		Suelos antrópicos sobre Rankers en pendiente	Lo normal es >10 t/ha·a
	Antiguos balates de cultivos abandonados			Cualquiera (lo normal p > 30)	Suelos antrópicos sobre Rankers en pendiente	Variable según la pendiente		Repoblación Forestal Preparación del suelo: ahoyado mecánico. Plantación: <i>P. halepensis</i> y en zonas ecológicas especiales con <i>Q. ilex</i>
Cultivos agrícolas	Agrícola		Variable pero < 30	Suelos antrópicos profundos	Variable según la pendiente		Mantener los cultivos si son de interés, con prácticas de conservación de suelos pertinentes	
Escasa vegetación de riberas	Forestal		Variable	Depósitos modernos	Escasa		Galerías con vegetación arbolada de raíz pivotante	
< 600 Área dominada	Matorral serial	Forestal	p < 30	Suelos pardos (lo normal calcimórficos)	Regular >10 t/ha·a	Al norte y centro de la cuenca > 1,5 UB Al sur y oeste la cuenca > 2,0 UB En las áreas más soleadas del noreste >1,0 UB	Repoblación Forestal Preparación del suelo: en cuencas de contorno. Plantación: <i>P. halepensis</i> y en zonas ecológicas especiales con <i>Q. ilex</i> o <i>Ceratonia siliqua</i> en las zonas más cálidas	
				30<p<40	Rendzinas (en ocasiones Rankers de pendiente)		Escasa >10 t/ha·a	Repoblación Forestal Preparación del suelo: en banquetas. Plantación: <i>P. halepensis</i>
				p > 40	Rendzinas (abundando Rankers de pendiente)			Repoblación Forestal Preparación del suelo: ahoyado mecánico. Plantación: <i>P. halepensis</i>
	Antiguos balates de cultivos abandonados			Cualquiera pero en general elevada	Suelos antrópicos sobre rendzinas o rankers	Regular Lo normal > 10t/ha·a		Repoblación Forestal Preparación del suelo: ahoyado mecánico. Plantación: <i>P. halepensis</i> y en zonas especiales con <i>Q. ilex</i> o <i>Ceratonia siliqua</i>
	Matorral serial				Muy someros y erosionados	Escasa > 10t/ha·a	<1,0 UB Bajo	Mantener el matorral
	Barrancos con balates en escalera	Forestal Agrícola marginal		Elevada p>12	Suelos antrópicos causados por la nivelación del terreno	No procede, pues no corresponde al modelo	Bajo, pero el drenaje en los barrancos lo puede aumentar	Plantación de árboles aislados de algarrobo (<i>Ceratonia siliqua</i>) o olivo (<i>Olea europaea</i>) previo ahoyado puntual

ara y asurca con bueyes para atajar la erosión). El frijol se siembra en mayo y se cosecha en entre julio y agosto, mientras que el maíz se instala en septiembre y se cosecha en febrero. Los dos meses de sequía, marzo y abril, son en los que se introduce una baja densidad de ganado en las parcelas de cultivo. La rotación también se suele hacer a la inversa. Dada la alta densidad que adquieren las cubiertas tanto del frijol como del maíz durante su maduración, que coincide con el periodo de la estación lluviosa, se consigue una buena cubierta del suelo en la época más proclive a la erosión. Además, próximos a los cultivos visitados, existían parches de bosque secundario resultado del abandono de cultivos por agricultores para recuperar los terrenos, tras observar en ellos fenómenos de erosión acelerada.

Los restantes cultivos como el tiquisque o el jengibre prestan una escasa protección al suelo. Su cultivo no debería extenderse por pendientes superiores al 12%, aunque en

la práctica esta limitación no siempre se cumpla. También existen cultivos mixtos de tiquisque o jengibre en combinación con el maíz; que dado el mayor porte vegetal del maíz, evidentemente proporcionan una mejor cobertura al suelo y una mayor protección ante la erosión hídrica. Ante esta situación, se planteó la ordenación agro-hidrológica de la cuenca del río Pejibaye que se muestra de forma resumida en la Tabla 3.

CONCLUSIONES

1. Las dos cuencas necesitan regenerarse ecológicamente para mejorar su rentabilidad en términos de aprovechamiento sustentable. En el caso de la cuenca de la rambla del Aljibe dicha regeneración implica unas inversiones externas (repoblaciones) para restablecer su cubierta vegetal anterior; mientras que en la cuenca del río Pejibaye ésta se puede conseguir eliminando el uso agrícola o de pastizal en las áreas donde aparecen problemas

Tabla 3. Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Pejibaye (Pérez Zeledón, Costa Rica), 2006.

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipos de suelo	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación H & F.	
		Actual	Vocación				Actuaciones	Objetivo
Área dominante > 700 m	p>30	Bosque secundario	Forestal	En general profundos	No se detectan	Alta	Mantener el bosque secundario	Protección
	p> 60	Pastizales extensivos	Forestal	En general profundos	1)Deslizamientos superficiales 2)Erosiones superficiales 3) Pérdida de productividad del suelo	Se estima alta	Permitir la invasión del bosque secundario cuando aparezcan deslizamientos o problemas serios de erosión	Protección
	p<30			Profundos	1)Erosiones superficiales 2) Pérdida de productividad del suelo.		1) Permitir la invasión del bosque secundario cuando aparezcan deslizamientos o problemas serios de erosión. 2) Sustituir por cultivos abancalados rigurosamente controlados (cafetales de sombra) 3) Investigar otras soluciones de protección	Producción sostenible
	60>p>30	Cafetales de sombra	Agrícola sostenible	Profundos	No se detectan, salvo en algunos casos en los lindes del cultivo	Se estima alta	Mantener el cafetal de sombra extremar los cuidados, en los lindes del cultivo Mantener el cafetal de sombra	Producción sostenible
	p<30			profundos	1)Deslizamientos superficiales 2)Erosiones superficiales 3) Pérdida de productividad del suelo	Se estima alta	1) Permitir la invasión del bosque secundario cuando aparezcan deslizamientos o problemas serios de erosión. 2) Sustituir por cultivos abancalados rigurosamente controlados (cafetales de sombra) 3) Investigar alguna otra solución que mejore la protección del suelo	Protección
	p>30	Cultivos 1) rotación maíz-frijol o viceversa.	Agrícola marginal		1)Erosiones superficiales 2) Pérdida de productividad del suelo		Mantener los cultivos, aplicando prácticas de conservación de suelos	Producción sostenible
	30>p>24	2) Jengibre o tiquizque a veces combinado con el maíz	Agrícola marginal		1)Erosiones superficiales 2) Pérdida de productividad del suelo		Mantener los cultivos.	Producción sostenible
	24>p>12		Agrícola		Erosión laminar		Mantener el bosque secundario y si no existe introducirlo	Protección
	p<12		Agrícola		Tracción de la corriente.		Mantener el bosque secundario	Protección
p<12	Márgenes y riberas	Forestal						
Área dominada < 700 m	p>30	Bosque secundario	Forestal	En general profundos	No se detectan	Alta	Mantener el bosque secundario	Protección
	30>p	Pastizales extensivos.	Forestal	Profundos	1)Deslizamientos superficiales 2)Erosiones superficiales 3) Pérdida de productividad del suelo.	Se estima alta	1) Permitir la invasión del bosque secundario cuando aparezcan deslizamientos o problemas serios de erosión. 2) Sustituir por cultivos abancalados rigurosamente controlados (cafetales de sombra) 3) Investigar alguna otra solución que mejore la protección del suelo	Protección
	p<30				1)Erosiones superficiales 2) Pérdida de productividad del suelo.		Mejorar las técnicas de empleo del pastizal	Producción sostenible
	p<40	Cafetales de sombra	Agrícola sostenible	Profundos	No se detectan, salvo en algunos casos en los lindes del cultivo	Se estima alta	Mantener el cafetal de sombra, extremando los cuidados en los lindes del cultivo	Producción sostenible

serios de erosión del suelo; siempre que el suelo conserve su capacidad regeneradora, que de momento lo conserva.

2. Ambas cuencas son vulnerables ante eventos torrenciales, especialmente los extremos. De hecho la cuenca del río Pejibaye fue afectada por el huracán César (27-07-1996), causándole deslizamientos superficiales del terreno en sus laderas, la destrucción de un puente en el propio río Pejibaye cerca de la población que lleva su nombre y otras importantes pérdidas en cosechas y materiales para la población.

3. Centrándose en el tema específico de la erosión del suelo en la cuenca del río Pejibaye, lo previsible es que resulte muy diferente el efecto final que le pueda causar un deslizamiento epitelial, del que no se toman a tiempo medidas para corregirlo, que el efecto final que pueda derivarse de una erosión superficial generalizada, aunque en ambos casos la consecuencia final sea la pérdida de superficie para la agronomía. La progresión de un deslizamiento epitelial por falta de corrección, puede poner en peligro

a medio o a largo plazo, dependiendo de la frecuencia de los eventos torrenciales, la estabilidad de la ladera donde se ubica; al tiempo que deja prácticamente inservible para cualquier tipo de aprovechamiento una superficie que en principio debería utilizarse como bosque. Mientras que la erosión superficial generalizada podría concluir en dos situaciones diferentes, ambas indeseables: a) si se manifiesta o predomina el efecto de la erosión laminar, ésta reducirá sensiblemente la profundidad del suelo y con ello lo empobrecerá, perdiendo sus cualidades actuales; b) si lo que prevalece es una erosión en regueros o surcos, éstos se profundizarán generando barranqueras y el terreno perderá sus cualidades para el cultivo, pudiendo incluso generarse torrenteras que deberán ser corregidas.

4. La principal recomendación que se propone para atajar la erosión superficial grave en la cuenca del río Pejibaye es la de permitir que el bosque invada nuevamente al suelo, cuando en él aparecen deslizamientos epiteliales o una erosión superficial acelerada, asegurándose para ello que el suelo continúe manteniéndose

la capacidad necesaria para restaurar por sí mismo el bosque secundario en un período entre cinco y diez años; operación que en la cuenca vertiente al río Pejibaye se practica, aunque no todo lo deseable. Esta solución no resulta efectiva en los climas templados semiáridos, especialmente si su cubierta vegetal se encuentra degradada (como en la cuenca del Aljibe), por lo que se requiere recurrir a las repoblaciones y medidas de sistematización del terreno; incluso para las repoblaciones se necesitan de preparaciones del terreno previas a la plantación.

5. Es conveniente plantear la ordenación agro-hidrológica de la cuenca del río Pejibaye, mientras sus problemas se pueden corregir aprovechando su propia capacidad regeneradora.

6. En el caso de la cuenca de la rambla del Aljibe la propuesta de corrección se planteó de un modo institucional, presentando su proyecto de restauración hidrológico-forestal ante las instancias pertinentes. Mientras que en

la cuenca del río Pejibaye la forma de plantear su restauración se desarrolla de un modo más complejo, a partir de organismos colaboradores como la CINPE de la Universidad Nacional de Costa Rica; que se encarga de exponer tanto a la Administración como a la población de la cuenca los problemas existentes y de mostrándoles sus riesgos ante el futuro y las medidas a asumir para paliar los efectos de estos riesgos.

7. Normalmente los cauces institucionales para obtener financiación para restaurar las cuencas sólo se materializan sobre el territorio ante situaciones de eventos torrenciales extraordinarios que afectan gravemente a la cuenca y causan situaciones graves y urgentes para su población. Por ello se llama la atención a ésta sobre la necesidad de mantener su capacidad productiva de la cuenca en términos de aprovechamiento sustentable en todo momento; porque el deterioro paulatino y difícil de percibir a simple vista de las cuencas, difícilmente consigue ayudas para su corrección.



SUMMARY

Water & Forest Restoration of basins began in the latter part of 19th century in mountain countries of southern Europe as a tool against the increase in number and intensity of effects due to geo-torrential processes in mountain catchments along with the increase of winter avalanches. Before the 20th would start, the engineers responsible for the correction of mountain torrents noticed the need of restoring drainage watersheds if the consolidation of hydraulic works along torrential watercourses was to be achieved.

In the 20th century, the conception of restoration of basins underwent new dimensions, like the preservation of drainage catchments of reservoirs or like the avoidance of desertification. But in the latter years of the past century and also the former ones of 21st, ideas and techniques on basin management and restoration have been spreaded throughout the world, with a special significance in Latin America

This paper compares two small basins, the catchment of the rambla de El Aljibe in Almería (Spain) and the Pejibaye river basin in Pérez Zeledón (Costa Rica). For each one, the study tries to show the importance of the application of the criteria and the techniques involved in basin management and restoration, the aims continuing to be the same as always: the protection against geo-torrential processes after extreme meteorological events and the maintenance of sustainable use. The experiences are part of the Project INCO Evidence -Based

Policy for Integrated Control of Forested River catchments in extreme rainfall and Snowmelt (EPIC FORCE) financed by the European Commission and leaded by the University of Newcastle (U.K.).

REFERENCIAS

- Mintegui Aguirre J. A., De Simón Navarrete E., García Rodríguez J. L., Robredo Sánchez J. C. (1993) La restauración hidrológico-forestal de las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea, *Informaciones Técnicas* 22/93, Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca, pp. 325, Sevilla
- Mintegui Aguirre J. A., Robredo Sánchez J. C., García Viñas J. I., López Leiva C. (2006) Introducción a la restauración hidrológico-forestal de cuencas hidrográficas, *Ecología*, núm. 20, páginas 389-414, Organismo Autónomo Parques Nacionales, 2006, España.
- Miranda M. (2005) Caso de estudio: cuenca del río Pejibaye, Informe del Proyecto EPIC-FORCE, Costa Rica, pp. 5.
- Miranda M. (2005) Interaction between forest water and agriculture sectors, EPIC FORCE Project Report, Costa Rica, pp. 13.
- Valverde C. (2005) Informe Biofísico de la cuenca del río Pejibaye, Informe del Proyecto EPIC-FORCE Costa Rica, pp. 16.



Importancia y Gestión del Material Leñoso en los Cauces

L. Mao (1,2), F. Comiti (1),
A. Andreoli (1,3), M. A. Lenzi (1)

- (1) Departamento Territorio y Sistemas Agro-Forestales, Universidad de Padova (Italia)
(2) Departamento de Geografía, Universidad de Hull (UK)
(3) Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente, Universidad de Concepción (Chile)

Resumen

Este documento propone introducir al lector el tema de la presencia del material leñoso en los cauces fluviales. Serán ilustrados los elementos básicos para la comprensión de la dinámica del material leñoso, su importancia bajo el punto de vista funcional y ecológico, y de las posibles desventajas originadas por su presencia en los cauces. La investigación aborda además la problemática de la medición y la cuantificación del material leñoso, ilustrando la técnica de levantamiento de campo adoptadas a los casos de pequeños ríos de montaña y la técnica de levantamiento fotogramétrica mas adecuada en el caso de ríos pedemontanos a canales múltiples. A continuación se ilustran las distintas obras hidráulicas que pueden ser utilizadas para la retención de material leñoso transportado por las avenidas y los principios básicos para la elección de los tipos de obras más aconsejables a casos específicos, variables desde torrentes de alta pendiente a ríos de llanura. Finalmente, serán ilustradas las nuevas tendencias y líneas estratégicas relacionadas con la gestión integrada y sostenible de ríos y con las necesidades de nuevas técnicas de restauración fluvial.

Palabras clave: Material leñoso; torrentes; ríos de grava; riesgo hidráulico; manejo fluvial; restauración fluvial.

La realización de este documento ha sido posible gracias al proyecto Europeo EPIC-FORCE (Evidence-based policy for integrated control of forested river catchments in extreme rainfall and snowmelt), que conjuga esfuerzos de investigación científica de Universidades Europeas y de América Latina sobre el tema del rol del bosque frente a eventos extremos. Para profundizar el tema del rol y manejo del material leñoso en los cauces, más informaciones y documentos están a disposición en el sitio <http://www.tesaf.unipd.it/epicforce/project.asp>.

El Material Leñoso En Los Cauces

La vegetación arbustiva y arbórea que vive alrededor de los cauces puede, por mortalidad natural o por causa de erosiones de orillas, llegar a los cursos de agua en forma de material leñoso. El material leñoso de longitud mayor de 1 m y diámetro mayor de 10 cm es corrientemente llamado, en la terminología anglosajona, large woody debris.

El material leñoso en los cauces está sujeto a procesos naturales de degradación por efecto de los elementos físicos (roturas, humedad,...) y biológicos (insectos, hongos,...). Además, el material leñoso puede ser transportado aguas abajo por efecto de las avenidas. Abundancia y dinámica del material leñoso en los cauces son muy variables, y dependen de las condiciones climáticas de crecimiento de la vegetación arbórea ribereña y de la degradación del material, además del acacimimiento de avenidas y de la tipología fluvial [9; 11].

Esquemáticamente, es posible pensar a la presencia y a la dinámica del material leñoso en los cauces como a un proceso similar a los sedimentos. De hecho, así como para los sedimentos, en un cierto tramo existen: entrada de material desde aguas arriba; y salidas por transporte aguas abajo; áreas surgentes de material leñoso como los bosques ribereños y áreas de acumulaciones temporáneas. Además, existe una particular forma de salida del material leñoso: su degradación natural [11].

El material leñoso en los cauces está sujeto a la capacidad de las avenidas de transportarlo aguas abajo. Los troncos muy largos son más difíciles de ser transportados, especialmente en ríos pequeños y estrechos de montaña. Por el contrario, en los grandes y anchos ríos de llanura, el límite para el transporte son avenidas con calado suficiente que permite la flotación del material leñoso. De esta manera, se verifica una segregación de las características dominantes de dimensiones, cantidades y tiempos de residencia del material leñoso en ríos con diferentes características morfológicas (Figura 1). Esta diferencia en las tipologías dominante de transporte, implica que el material leñoso puede ser acumulado en modo diferente en los distintos cursos de agua [1].

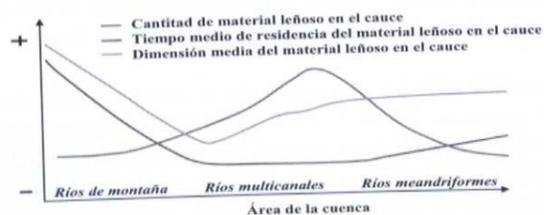


Figura 1. El material leñoso a lo largo de un sistema fluvial (Fuente: [14]).

Cuando un árbol o una porción del mismo cae o es trasladado a un río y se deposita en el mismo curso o en sus orillas, empieza a funcionar como un rastrillo, el cual retiene otro material flotante más pequeño. Por otra parte, si el elemento es suficientemente pequeño, y puede ser transportado aguas abajo por efecto de las avenidas, tenderá a acumularse en particulares tramos del río.

La tendencia del material flotante a detenerse por efecto de otros troncos o grandes rocas, es más evidente en cursos de agua de montaña donde el transporte de los elementos de mayor tamaño es ocasional. En los torrentes con pendiente alta y ancho limitado, a veces las acumulaciones de material leñoso ocupan toda la sección del cauce creando verdaderos "diques" (Figura 2).

En ríos de zonas pedemontanas y de llanura, donde se reduce la pendiente y el cauce se ensancha, el material leñoso, en cambio, se dispersa en el lecho (Figura 2), o tiende a acumularse en posiciones particulares, como aguas arriba de islas o en correspondencia de curvas de meandros.

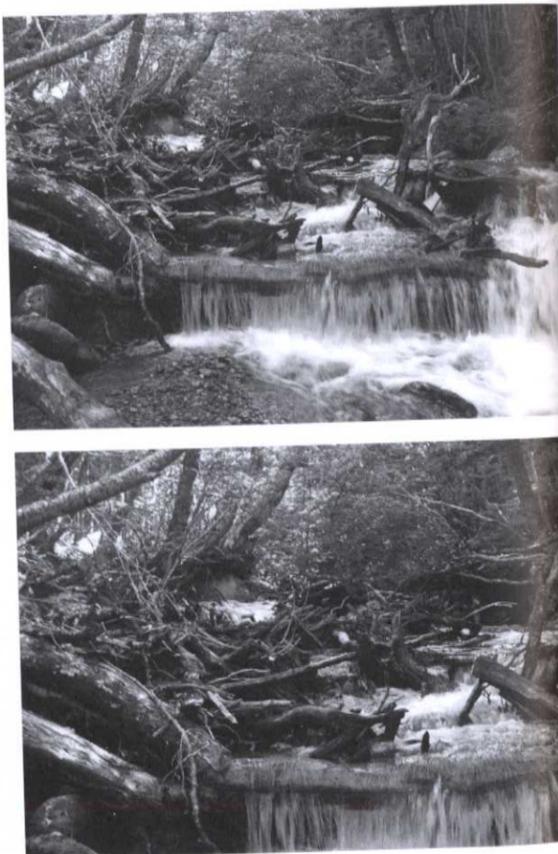


Figura 2. Material leñoso en un río de montaña y en un río de grava.

La importancia del material leñoso en los cauces

Cuando está organizado en acumulaciones, el material leñoso influencia fuertemente la morfología y los pro-

cesos morfodinámicos del cauce. Las acumulaciones de material leñoso reducen las erosiones del lecho del cauce, estabilizan las orillas, facilitan la sedimentación de los sólidos y aumentan la resistencia al flujo.

La presencia de acumulaciones origina una diversificación morfológica del curso de agua, que produce diversificación de habitats y consecuentemente diversidad biológica [2; 5]. El material leñoso proporciona espacios y potencialidad de vida para muchos organismos acuáticos, a partir de los macroinvertebrados hasta los peces, que de estos macroinvertebrados se alimentan (Figura 3).

Más importante aún, es que en las pozas los peces pueden permanecer vivos durante los periodos secos del año y encontrar áreas de protección durante las avenidas. En general, el material leñoso tiene un rol fundamental en la creación, sustentación y diversificación de cadenas y redes tróficas. En su conjunto, el efecto del material leñoso es el de aumentar el poder de autodepuración de los cursos de agua, y el de reducir la carga de nutrientes que llegan a los estuarios y deltas.



Figura 3. El material leñoso crea habitats importantes para la fauna (Fuente: [18]).

Por otra parte, hay potenciales desventajas originadas por la presencia del material leñoso en los cauces. Desde siglos el hombre estableció sus ciudades y actividades alrededor de los ríos, reduciendo el espacio a disposición para la natural dinámica de expansión lateral y divagación de los ríos que, en correspondencia de las avenidas, tienden a retomar esos espacios que son naturalmente de su pertinencia.

En el esfuerzo de contener los ríos en espacios reducidos, todos los elementos naturales "incómodos", como la vegetación arbórea viva y el material leñoso tienden a ser removidos por ser potencialmente peligrosos. De hecho, el material leñoso puede obstruir puentes (Figura 4) o secciones transversales muy estrechas, causando inundaciones.

Para contrastar estas posibles fuentes de daños a centros urbanos y redes de infraestructuras se puede intervenir con acciones indirectas (gestión de la vegetación en los cauces) o directas (a través de obras).



Fig. 4. Los troncos acumulados aguas arriba de un puente han causado su rotura (Fuente: [6]).

Medición Del Material Leñoso En Los Cauces

Dada la importancia ecológica y también los potenciales peligros del material leñoso en los cauces, se destaca la necesidad de cuantificar su cantidad en los ríos. Las metodologías a adoptar dependerán de la tipología del río.

En los ríos de montaña

En pequeños ríos de montaña, donde el ancho es inferior a ~ 20 m, el único método de estimación de la cantidad de material leñoso es la medición directa. La medición puede ser total (o sea preveer mediciones en toda la longitud del río) o parcial, con muestreos casuales. En este último caso, es necesario elegir previamente la dimensión de los tramos a medir y su distribución espacial.

En estos tramos (de longitud ~ 50-100m) se procederá a la medición de la longitud y del diámetro (al centro del tronco) de cada elemento singular leñoso con longitud mínima 1 m y diámetro mínimo 10 cm [3; 7].

En las mediciones se usará una cinta métrica y una forcípula forestal. Para un levantamiento más detallado, será tarea del operador anotar informaciones suplementarias acerca del origen (transportados desde aguas arriba o no), la posición (adentro o en las márgenes del cauce), la orientación (paralelo o transversal a la corriente), el grado de libertad (libre o vinculado), el estado de degradación del tronco, y la presencia de ramas o raíces [4; 7; 10].

Cuando los troncos se encuentran acumulados, el objetivo es el de medir las dimensiones geométricas de la acumulación y estimar su volumen [4; 17]. Es oportuno también clasificar las acumulaciones según un criterio standard, como el de Abbe y Montgomery [1], que dis-

tingue tres tipos de acumulaciones dependiendo del origen de sus elementos: autóctonos (elementos clave no transportados desde aguas arriba), de transporte (elementos clave transportados) y acumulaciones mixtas.

Aunque esta metodología sea más compleja e implique un segundo nivel de clasificación [1], en esta sede se recuerdan dos tipologías típicas de ríos de montaña, como el log step (elemento clave autóctono caído desde las márgenes y formando un escalón, Figura 5) y el valley jam (acumulación muy grande de ancho igual o mayor al ancho del cauce, (Figura 6).



Figura 5. Un único elemento leñoso transversal a la corriente forma un escalón o log step.



Figura 6. Grandes acumulaciones de elementos leñosos en el cauce se definen valley jams.

En grandes ríos pedemontanos y de llanuras

Cuando las valles se ensanchan, los ríos se presentan con menor pendiente y más anchura. En estos tramos el lecho es usualmente de grava y arena, hay deposición de sedimentos y material leñoso (Figura 1) y se pueden formar islas arbóreas (Figura 7).

Dada la anchura de ríos de este tipo (hasta más de 1 Km), la medición manual de todos los troncos presentes en un



Figura 7. Aspecto de un río de gravas a canales múltiples (Fiume Tagliamento, Italia).

cierto tramo es un trabajo dispendioso y poco factible. En estas condiciones puede ser abordable el levantamiento manual de todos los elementos orgánicos que se encuentran en una faja de 50-100 m alrededor de una cierta sección transversal (Figura 8). En este modo se puede realizar un muestreo transversal al cauce, considerando al mismo tiempo (y en modo segregado) distintas unidades morfológicas típicas de estos cauces (canales principales y secundarios, barras, islas y planicie de inundación).

La medición de cantidades de material leñoso en distintas porciones del lecho es importante porque en ríos de este tipo, la variabilidad espacial de la abundancia del material leñoso puede ser muy elevada (Figura 8). Por esta razón, al fin de cuantificar con una buena aproximación los volúmenes de material leñoso en un cauce ancho, es aconsejable realizar varios muestreos transversales (separados de 2-3 km).

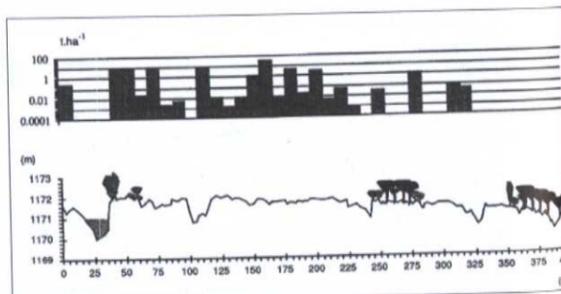


Figura 8. Muestreo por faja alrededor de una sección transversal (Fuente: [13]).

En ríos muy anchos con grandes espacios ocupados por elementos sedimentarios y con poca cubierta arbórea (Figura 7), donde la morfología es dominada por canales múltiples (Figura 1) ha sido recientemente aplicada con éxito una nueva técnica de muestreo por interpretación fotogramétrica [12]. Este puede ser total o parcial, y prevé la interpretación de fotografías aéreas de la superficie del cauce. Las fotos a usar deberán tener una buena resolución (píxeles de dimensión mínima 10 cm), lo que depende de la cota de vuelo, de la calidad de la foto digi-

tal adquirida, y de la dimensión mínima de los troncos a medir (Figura 9).

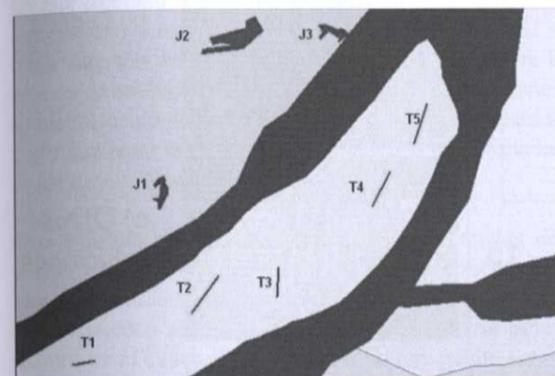
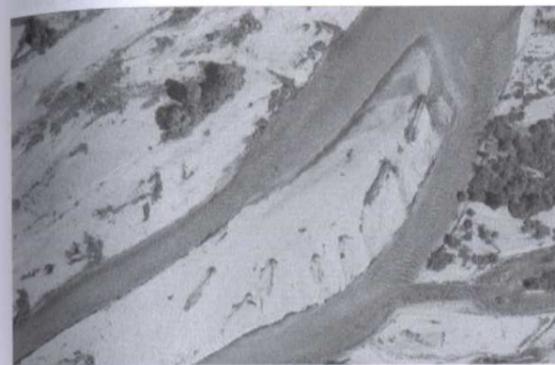


Figura 9. Aplicación del método de levantamiento fotogramétrico.

Operando en ambiente SIG, será posible identificar todos los troncos aislados y las acumulaciones, trazar sus perfiles y determinar sus dimensiones planimétricas (Figura 9).

Este método necesita de una calibración de campo a través de una comparación con muestreos manuales pero se ha demostrado razonablemente aplicable en ríos de gravas para la estimación del volumen de material leñoso en el cauce [12].

El método fotográfico no es aplicable en ríos sinuosos, ya que el material leñoso tiende a acumularse en las orillas del cauce bajo la cubierta arbórea ribereña, no visible desde una fotografía aérea.

EL MANEJO DEL MATERIAL LEÑOSO EN LOS CAUCES

En algunas circunstancias, después de la cuantificación de la cantidad de material leñoso en el cauce y de la estimación de la cantidad de vegetación ribereña y forestal que podría potencialmente ser erosionada y transportada aguas abajo por una avenida extraordinaria, se podría llegar a hipotizar que esa cantidad es peligrosa en algunas secciones críticas, puentes u otras actividades antrópicas próximas al mismo río.

En este caso las posibles estrategias de acción contemplan, por un lado, intervenciones directas con obras de retención del material leñoso y, por el otro, la adopción de instrumentos indirectos tal como una gestión adecuada de la vegetación ribereña y del material leñoso.

Obras de retención

Si los elementos antrópicos vulnerables sujetos al peligro proporcionado por el transporte de troncos son localizados y puntuales (puentes, estrechamientos, pasajes cerca de centros habitados), puede ser conveniente intervenir construyendo obras de captura y retención de material flotante aguas arriba de estos puntos sensibles.

En pasajes muy estrechos, como las alcantarillas en los terraplenes de las carreteras y ferrocarriles, es aconsejable posicionar estructuras metálicas de retención del material leñoso aguas arriba de las mismas. Si el ancho del cauce es superior a 10 m, es necesario recurrir a la construcción de obras hidráulicas de mayor envergadura.

Las primeras obras hidráulicas (diques) adoptadas para la retención de material leñoso fueron construidas en el área Alpina europea a partir de la mitad del siglo pasado, y derivaban de obras abiertas filtrantes para la retención de sólidos transportados al fondo.

En una posterior evolución de la técnica de construcción, se modificaron obras pensadas para contener la fuerza impactante de coladas detriticas. En estas tipologías de diques selectivos se incorporaron filtros con doble o triple inclinación, para permitir la acumulación del material flotante en la parte alta del dique, de modo que la parte baja pudiera seguir ejerciendo su efecto selectivo en relación al material sólido transportado al fondo (Figura 10).



Figura 10. Dique selectivo con filtros a múltiple inclinación.

Entre las obras proyectadas para la retención del material flotante hay varias tipologías, que tienen un campo de aplicación que depende del área de la cuenca vertiente (o del caudal de proyecto) y de la cantidad de material leñoso (en m3 por metro de ancho del cauce) que la obra debe retener (Figura 11).

Para ríos que drenan pequeñas cuencas de montaña, son indicadas obras poco impactantes como los diques de red (Figura 11a), que son eficaces también en la contención de coladas detríticas [15]. Para cursos de agua más anchos y con menor pendiente, se aconsejan los diques a rastrillo, pues son capaces de retener los troncos y tienen poco efecto en el transporte sólido (Figura 11b). Para

situaciones donde la cantidad de material leñoso a retener es potencialmente superior a 80 m³ por metro de anchura del canal, es aconsejable intervenir con obras particulares como filtros diseñados para ser instalados aguas arriba de diques a fisura (Figura 11c) o diques a cable en el caso de ríos muy anchos (> 20-30 m) y con pendiente inferior al 1%.

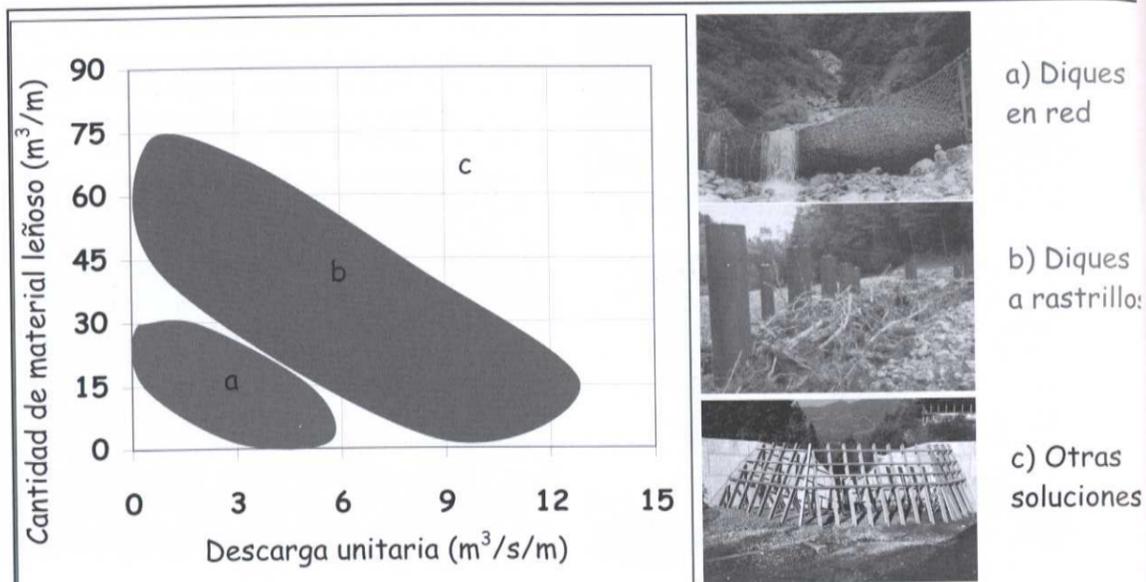


Figura 11. Campo de utilización de estructuras para la retención de material leñoso (Fuente: [15]).

Los diques a cable son una de las obras más innovadoras para estas particulares aplicaciones, dado el muy bajo impacto ambiental y paisajístico y la gran eficiencia de captura del material flotante (Figura 12). La obra está constituida por un contrafuerte puesto en el centro del cauce y de cables fijados en las orillas del río y en el contrafuerte. El material flotante es capturado por los cables, dirigido hacia los márgenes y allí puede ser recuperado durante o después de una avenida con el auxilio de máquinas operadoras.



Figura 12. Contrafuerte central de un dique a cable.

Gestión de la vegetación ribereña

En el pasado, las autoridades de gestión de los ríos interpretaron el concepto de manejo del cauce como sinónimo de "limpieza" del mismo que, a menudo, se realizaba como corte de toda la vegetación arbórea y remoción del material leñoso desde el lecho. La tendencia era la de entender el río más bien como una "autopista para el flujo" que como un complejo y frágil sistema ecológico-funcional que mejor funciona y se sustenta si se le deja el espacio para encontrar y mantener su propio equilibrio.

Hoy en día, esta creciente conciencia está estimulando la tendencia a mantener en los cauces la vegetación ribereña y el material leñoso [16]. De hecho, los gastos de manutención de la vegetación en los ríos son muy altos, y no garantizan frente a eventos extraordinarios la completa seguridad hidráulica; ya que pueden ser activadas imprevisibles surgentes de material leñoso y los troncos de mayores dimensiones pueden ser transportados aguas abajo por distancias considerables (hasta decenas de km). Estas evidencias llevan a la conclusión que, desde el punto de vista funcional y económico, el modo mejor de abordar el problema es el de apartar los elementos vulnerables alrededor del río del peligro. Si esto no fuera posible, es entonces más aconsejable defender puntualmente a través de obras de retención del material las áreas vulnerables.

¿EL RETORNO DEL MATERIAL LEÑOSO A LOS RÍOS?

Si bien algunos ríos en el mundo se han mantenido relativamente naturales e intactos, la gran mayoría de los demás están muy lejos de un estado de completa naturalidad. Esta condición ha llevado a la pérdida de la estabilidad morfológica, de la población de peces y del poder de auto depuración de los ríos. Además, después de una historia de gestión entendida como "defensa contra los ríos" se empieza a intuir que todos los gastos económicos y las inversiones realizadas, no han llevado a una disminución del riesgo hidráulico, sino muchas veces a su aumento.

En este contexto, la línea operativa actual es la de intentar recuperar y restaurar los ríos, y es ya una realidad la reintroducción del material leñoso en los cauces para la defensa de orillas, diversificación morfológica y creación de nichos ecológicos. Esta operación ha ya demostrado poder aumentar la estabilidad y también la biodiversidad de los cursos de agua [5; 16].

Si es posible, se pueden usar troncos recuperados del mismo río; en caso contrario, los troncos pueden ser trasladados desde otros sitios cercanos (Figura 13). Los troncos pueden ser dejados libres de organizarse por sí mismos en el cauce, si aguas abajo no hay puentes o sitios vulnerables. Si esto no fuera posible, se pueden armar o ligar con cadenas los troncos a las orillas del cauce.

En general, la aplicación de estas técnicas de recuperación fluvial dejan un cierto espacio para una libre interpretación de la intervención por parte del operador, pero es importante seguir algunas indicaciones, como:

- No obstruir la sección transversal por más del 10%;
- Usar ríos cercanos del mismo tamaño y mor-

fología (y en condiciones "naturales") para estimar la cantidad de material leñoso potencialmente presente en el cauce;

- Es preferible usar árboles recogidos en áreas cercanas, o por lo menos árboles de la misma especie, y es preferible usar trozos de varios tamaños para aumentar la creación de varios hábitats;
- Es fundamental monitorear las intervenciones en el tiempo para mejorar su funcionalidad y las futuras intervenciones.

CONCLUSIONES

La vegetación ribereña que llega a los cauces en forma de material leñoso, influencia fuertemente la morfología del cauce y tiene un rol fundamental en la creación, sustentación y diversificación de cadenas y redes tróficas. Por otro lado, el material leñoso puede obstruir puentes o secciones muy estrechas, causando inundaciones. Es entonces necesario medir la cantidad de material leñoso en los cauces y estimar la cantidad de vegetación arbórea ribereña potencialmente erosionable y transportable aguas abajo por avenidas extraordinarias.

Es recomendable estimar si esas cantidades pueden ser peligrosas para puentes o a otras infraestructuras próximas al río. En este caso, es aconsejable alejar los elementos más vulnerables alrededor del río. Si eso no fuera posible, es necesario defender puntualmente estos elementos vulnerables a través de obras de retención del material leñoso.

Para la estabilización de los cauces y para diversificar sus estructuras morfológicas y ecológica, la línea operativa actual es la de favorecer la presencia de material leñoso en los cauces. En algunos casos, puede ser oportuna su reintroducción en los cauces para la defensa de orillas, diversificación morfológica y creación de nichos ecológicos.

REFERENCIAS

- [1] Abbe TB, Montgomery DR. 2003. Patterns and process of wood debris accumulation in the Queets River basin, Washington. *Geomorphology*, 51, 81-107.
- [2] Anderson NH. 1982. A survey of aquatic insects associated with wood debris in New Zealand streams. *Mauri Ora* 10, 21-33.
- [3] Andreoli A, Carlig G, Comiti F, Iroumé A. 2007. Residuos leñosos de gran tamaño en un torrente de la Cordillera de Los Andes, Chile: su funcionalidad e importancia. *Bosque*, 28(2), 83-96.
- [4] Andreoli A, Comiti F, Lenzi MA. 2007. Characteristics, distribution and geomorphic role of large woody debris in a mountain stream of the Chilean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1675-1692.
- [5] Blank. 2003. Response of fishes and aquatic habitats to sand-bed stream restoration using large woody debris. *Hydrobiologia*, 494, 251-257.
- [6] Bradley JB, Richard DL, Bahner CD. 2005. Debris control structure - Evaluation and countermeasures. *Hydraulic Engineering Circular 9. Report n° FH-WA-IF-04-016. U.S.D.T.*, pp. 179.
- [7] Comiti F, Andreoli A, Lenzi MA, Mao L. 2006. Spatial density and characteristics of woody debris in five mountain rivers of the Dolomites (Italian Alps). *Geomorphology*, 78, 44-63.
- [8] Gerhard M, Reich M. 2000. Restoration of streams with large wood: Effects of accumulated and built-in wood on channel morphology, habitat diversity and aquatic fauna. *International Review Hydrobiology*, 85(1), 123-137.
- [9] Gurnell AG, Piégay H, Swanson FJ, Gregory SV. 2002. Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, 47(4), 601-619.
- [10] Mao L, Andreoli A, Comiti F, Lenzi MA. 2008. Geomorphic effects of large wood jams on a subantarctic mountain stream. *River Research and Applications*, 24(3), 249-266.
- [11] Martin DJ, Benda LE. 2001. Patterns of in-stream wood recruitment and transport at the watershed scale. *Transactions of the American Fisheries Society*, 130, 940-958.
- [12] Pecorari E, Comiti F, Rigon E, Picco L, Lenzi MA. 2007. Caratterizzazione e quantificazione del legname in alveo in corsi d'acqua di grandi dimensioni; risultati preliminari sul fiume Piave, Italia. *Quaderni di Idronomia Montana*, 27, 477-488.
- [13] Piégay H, Gurnell AM. 1997. Large woody debris and river geomorphological pattern: examples from S.E. France and S. England. *Geomorphology*, 19, 99-116.
- [14] Piégay H. 2003. Dynamics of wood in large rivers. In: *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*. Gregory S, Boyer K, Gurnell AG (eds), American Fisheries Society, 37, 109-133.
- [15] Rimbock A. 2004. Design of rope net barriers for woody debris entrapment. Introduction of a design concept. *Proc. Interpraevent Symposium*, May 2004, Riva del Garda, TN, Italy.
- [16] Shields FD Jr, Morin N, Cooper CM. 2001. Design of large woody debris structures for channel rehabilitation. In *Proc. 7° Federal Interagency Sedimentation Conferences*, CD ROM, Washington, DC. II-42 - II-49.
- [17] Thévenet A, Citterio A, Piégay H. 1998. A new methodology for the assessment of large woody debris accumulations on highly modified rivers (example of two French piedmont rivers). *Regulated Rivers: Research and Management*, 14, 467-483.
- [18] WAWRC (Western Australia Water and Rivers Commission). 2000. The value of large woody debris (snags). *Water Notes*, 4 pp.



Efecto de la Cobertura Vegetal en la Respuesta Hidrológica de Cuencas Hidrográficas

C.Coello (1), F. Cisneros (1), J. Feyen (2)

(1) Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, PROMAS, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador. E-Mail: promas@ucuenca.edu.ec

(2) Department of Land Management and Economics, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Belgium. E-Mail: Jan.Feyen@biw.kuleuven.be

RESUMEN

Se investiga el efecto de la cobertura vegetal en la respuesta hidrológica en siete microcuencas en Ecuador, caracterizadas por una cobertura vegetal específica. El tamaño de las cuencas varía desde 56 y 1000 has, las coberturas se verifican como: bosque nativo, bosque de pinos, pajonal en el páramo, pastos, cobertura mixta, matorral y agricultura. Diferentes escenarios son analizados para la caracterización de la respuesta hidrológica, caudales máximos, periodos de retorno, el efecto de la cobertura vegetal demuestra tener una importancia significativa en la hidrología de las microcuencas. Las cuencas conservadas tienen una capacidad reguladora significativa si comparamos con las demás micro-cuencas.

Palabras claves: Cobertura vegetal, respuesta hidrológica, suelo, eventos de precipitación, periodo de retorno.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación ha sido desarrollada en el marco del proyecto internacional EPIC FORCE (Establecimiento de políticas basadas en evidencia para el control integrado de cuencas forestadas en eventos extremos de lluvia y deshielo) con el estudio de siete micro-cuencas caracterizadas por una cobertura vegetal en particular, se realizó un análisis profundo de la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación; el análisis contempla coberturas que presentan interés para el medio, ¿cual es el efecto en la agricultura, pastos y pinos como consecuencia de la actividad del hombre? en la respuesta hidrológica de las micro-cuencas, además cómo responde un suelo en condiciones inalteradas, el pajonal en el páramo, el matorral en Lise y el bosque nativo primario en Ortigas.

Las micro-cuencas en estudio se encuentran localizadas en el Ecuador, en la cordillera de los Andes, cinco de ellas afluentes del Océano Pacífico y dos afluentes del Océano Atlántico, estas correspondientes a zonas del Páramo Andino.

BASE CIENTIFICA

Muchos estudios han sido realizados para investigar el efecto de la vegetación en la respuesta hidrológica, así algunos investigadores demuestran que la vegetación es un parámetro muy importante; incrementa la capacidad de infiltración de los suelos afectando el tiempo y duración de la escorrentía [1]. Los suelos degradados del Austro Ecuatoriano se encuentran desprovistos de vegetación, y el suelo ha perdido completamente su estructura; a este respecto los estudios de Blackburn [2], demuestran que la infiltración es más baja en suelo descubierto de vegetación que en suelos debajo de los árboles y arbustos.

Estudios de infiltración han sido utilizados para diferentes propósitos: White y Sully [3] propusieron que los resultados de infiltración obtenidos con técnicas de mediciones in situ, pueden ser usados para estimar las consecuencias de la degradación estructural del suelo desde el punto de vista hidrológico. Dunne et al. [4] usa lluvia simulada para investigar las complejas relaciones hidrológicas entre infiltración, escorrentía y coberturas en Kenya.

Adicionalmente, el papel que tiene la cobertura vegetal del páramo en los procesos hidrológicos es desconocido. La precipitación hacia una determinada área puede ser interceptada por las plantas y evaporada, o, evapotranspirada de regreso a la atmósfera. Las pérdidas por intercepción podrían ser del 10 al 20% bajo pastos y cultivos, y hasta 50% bajo bosques [5]. La intercepción y retención de agua sin duda contribuyen significativamente al ciclo hidrológico [6].

Pensando que la (re)forestación con especies nativas ayuda a mantener los caudales en épocas de estiaje (como resulta en cuencas de media y baja montaña) se han sembrado árboles de diferentes especies en los pajonales, lo cual produce efectos desconocidos, probablemente reduciendo la producción hídrica [7, 8].

MATERIALES Y METODOS

Las micro-cuencas han sido seleccionadas cuidadosamente, todas están ubicadas en la cordillera de los Andes y representan un uso de suelo diferente, mediante la utilización de imágenes satelitales, fotografías aéreas y levantamiento con GPS, en la micro-cuenca fue posible clasificarlas por una cobertura vegetal predominante.

Para obtener la totalidad de la información se instaló una red completa de monitoreo en las siete micro-cuencas, cada una de ellas dispone de un sensor de nivel, ubicado en una sección de control construida para la determinación correcta de caudales. Una red de pluviógrafos ha sido distribuida eficientemente para la adecuada caracterización de las precipitaciones.

Los nombres de las cuencas por grupos con la cobertura vegetal y suelos predominantes de la cual nos referiremos en este artículo se muestran en el Tabla 1.

Tabla 1. Características de las microcuencas de estudio.

Grupo	Cuenc a	Área (km ²)	Cobetur a	Suelos
1	Lise	2.34	Matorral	Cambisol
	Panam á	10.01	Pastos	Leptosol
	Ortigas	0.99	Bosque nativo	Andosol
2	Río Grand e	3.08	Pastos, bosques, chaparro	Andosol
	Capari na	5.38	Pastos	Cambisol
3	Pajona l	1	Pajonal	Andosol
	Pinos	0.59	Bosque pinos	Cambisol

El procesamiento de datos tanto de precipitaciones como de niveles es automático las precipitaciones con una resolución temporal de 5min y los niveles cada 15 min.; de ahí que esta precisión permite encontrar valores máximos reales y no promedios generales diarios que hubiesen subestimado las mediciones registradas.

La metodología se basa en un análisis de los hidrogramas generados en cada micro-cuenca; utiliza el modelo hidrológico WESTPRO [9], se determina la separación de flujos característicos, base, sub superficial y superficial y la lámina precipitada se ha generada con un análisis de Thiessen [10].

Existen muchos parámetros que verdaderamente influyen en la generación de la escorrentía, aspectos como la pendiente, el área, la cobertura, los suelos son factores predominantes que provocan mas o menos escorrentía, en este sentido se trabaja con caudales específicos para la valoración hidrológica que elimina el factor área, las pendientes medias de las cuencas en cinco de ellas están alrededor del 45% quedando la cobertura suelo como uno de los factores relevantes para este análisis.

La caracterización por grupo de micro-cuencas, esta basada en la respuesta hidrológica que presentan las precipitaciones y sus periodos de retorno; además, se analizan los caudales específicos comparables entre los grupos, caudales máximos y mínimos presentados.

ANALISIS DE RESULTADOS

A partir de los registros horarios de precipitaciones se determinan las curvas de intensidad duración y frecuencia mediante un análisis estadístico de Gumbel, para eventos

extremos, de esta manera se logra calcular periodos de retorno a dichos eventos, los cuales permiten evaluar el comportamiento hidrológico de las micro-cuencas. La Figura. 1 presenta las curvas IDF para dos de las micro-cuencas analizadas, Pajonal y Ortigas.

Teniendo en cuenta la reducida serie de datos, se estima un periodo de retorno para las precipitaciones máximas que generan las diferentes respuestas hidrológicas. La Fig. 2 muestra el comportamiento para dos grupos de micro-cuencas, en función de su caudal específico. Un total de seis eventos importantes para el análisis son considerados hasta el año 2006, los cuales no se revelan como

eventos extremos; tienen un periodo de retorno menor a 10 años.

Para el caso de las microcuencas Pinos y Pajonal, durante el año 2007 se presentan precipitaciones más considerables, un evento en especial, el ocurrido el 21 de Junio de 2007 ocasiona la inundación parcial de un sector de la ciudad de Cuenca, con precipitaciones que superan los 10 años de periodo de retorno.

Este evento fue investigado cuidadosamente debido a la importancia de la magnitud y las consecuencias que trajo consigo. La respuesta hidrológica específica instantánea

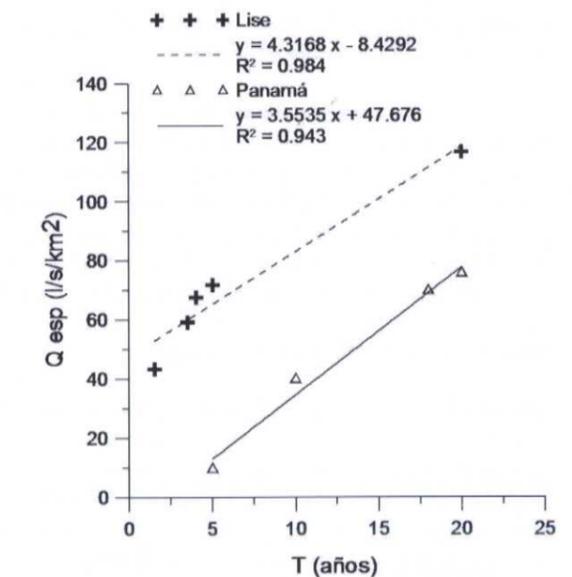
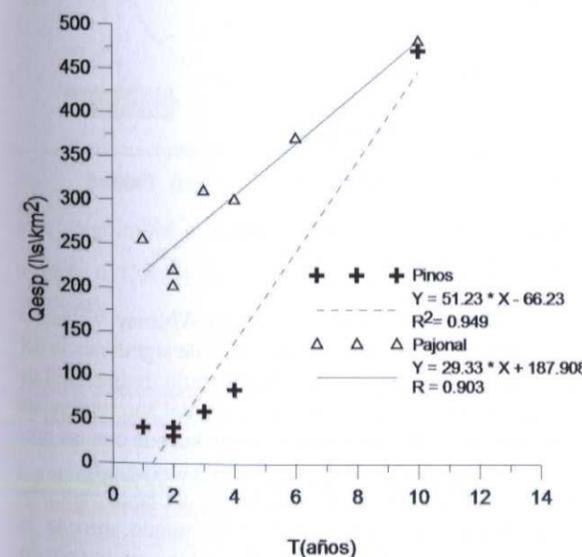
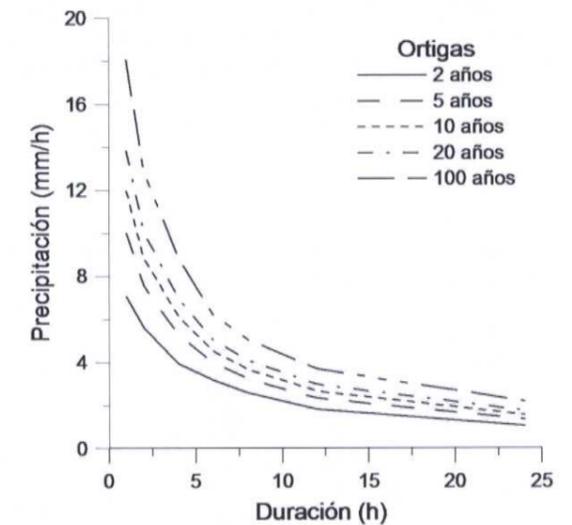
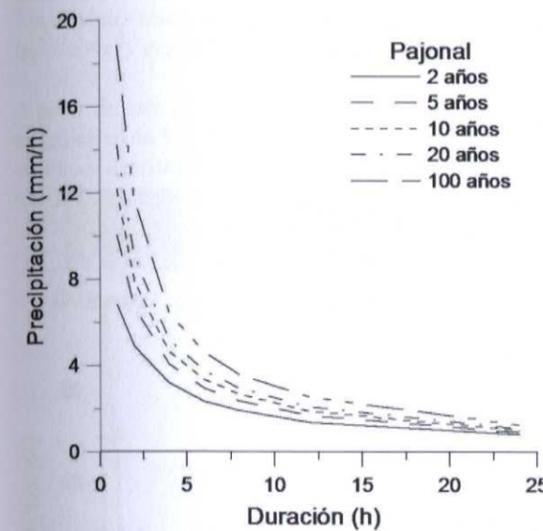


Figura 1. Curvas IDF para dos micro-cuencas de estudio.

Figura 2. Respuesta Q esp vs. Tiempo de retorno.

para ambas micro cuencas, demuestran ser semejantes y la cobertura vegetal del bosque de Pinos ha tenido un efecto mínimo de control del evento torrencial, la Figura 2 muestra que precipitaciones con elevados periodos de retorno, disminuyen el efecto de la cobertura vegetal y las diferencias de la respuesta hidrológica son mínimas.

El ajuste preliminar de los eventos indica una diferencia mayor entre cuencas, en la respuesta hidrológica a periodos de retorno pequeños; conforme el evento es más fuerte la diferencia parece acortarse en cierto grado; a pesar de la escasa información disponible, que no permite hacer conclusiones determinantes, la tendencia así lo indica

La respuesta hidrológica de las micro-cuencas presenta diferencias en regulación del flujo en épocas de verano, así mismo se identifican variaciones de flujo superficial rápido, que ocasiona un pico extremo de caudal, el diagrama de caja de la Fig. 3 muestra para cada micro-cuenca la distribución de caudales.

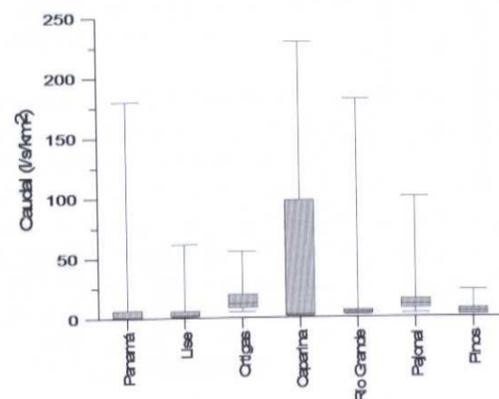


Figura 3. Diagrama de caja de caudales (mínimo, máximo, mediano, primer y tercer cuartil)

Los caudales mínimos presentados en las micro-cuencas, de acuerdo a su régimen climático, pueden ser indicativos del grado de conservación y/o alteración de las mismas, las cuencas que tienen influencia de actividad humana, presentan caudales mínimos bajos, lo contrario ocurre con las cuencas naturales de bosque nativo y pajonal, con una apreciable regulación en época de sequía.

Microcuencas del Páramo Ecuatoriano

Ahora la investigación se enfoca en las dos micro-cuen-

Tabla 2. Análisis estadístico Mann Whitney – Wilcoxon,

Parámetro	Z	Sig. Asintótica
Precipitación	-0.798	0.425
Caudal	-21.118	0.000

cas de páramo; la importancia de este análisis radica en que las dos microcuencas se localizan una al lado de la otra, se verifica la igualdad de ocurrencia de las precipitaciones y la diferencia de respuesta hidrológica en ambas micro-cuencas, mediante análisis estadístico no paramétrico, método muy utilizado en estudios de muestras que no tienen una distribución normal [11, 12], los resultados se muestran en el Tabla 2 y Fig. 4.

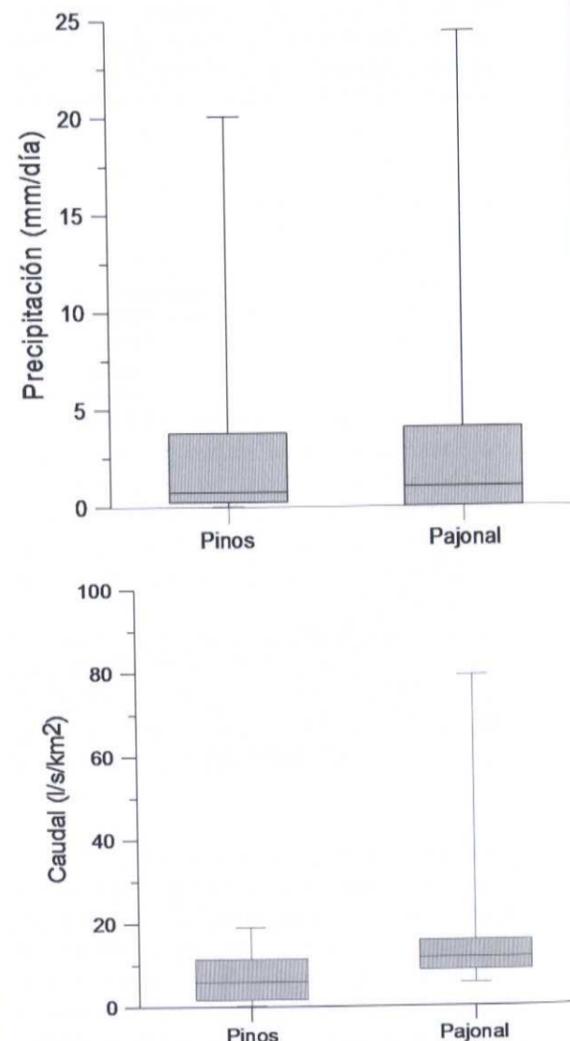
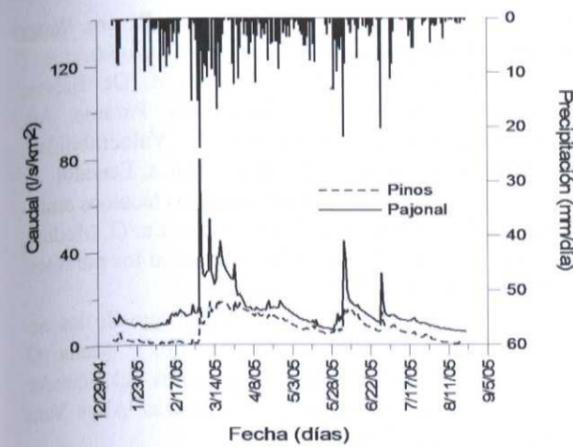


Figura 4. Precipitaciones y respuesta hidrológica para las cuencas de páramo.

La prueba no paramétrica de Mann-Whitney Wilcoxon [11,12] aplicada a caudales a un nivel de significancia del 5%, rechaza totalmente la hipótesis nula de igualdad de medianas, es decir los registros de caudal son totalmente distintos uno del otro, caso contrario sucede con las precipitaciones que son altamente significativas.

Con la elaboración de diagramas de caja tanto para precipitaciones como para caudales se puede apreciar la semejanza absoluta en precipitaciones, totalmente lo contrario para la respuesta hidrológica en cada una de las



microcuencas (Figura5). La microcuenca de Pinos presenta un consumo alto de agua por evapotranspiración, con caudales muy pobres, mientras que el Pajonal regula los eventos y presenta una respuesta hidrológica mayor

A partir de esta información se construye la gráfica que se indica en la Fig. 5 donde se muestra la respuesta hidrológica de estas dos micro-cuencas a los mismos eventos de precipitación. Nótese la similitud en la forma del hidrograma más no en la cantidad de caudal de salida.

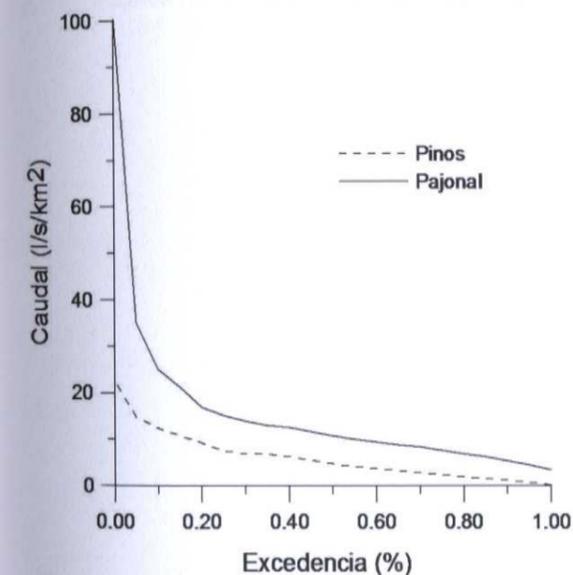


Figura 6. Curvas de duración para las microcuencas inalteradas.

Figura 5. Respuesta hidrológica a los mismos eventos de precipitación.

La investigación realiza también el análisis de las curvas de duración de caudales diarios en estas micro-cuencas. Se ilustra en la Fig. 6 dichas curvas y se denota que la cobertura vegetal que para el caso de los pinos disminuye totalmente la respuesta hidrológica, a causa de un eleva-

do consumo de agua. La diferencia de volúmenes regulados es evidente y merecen consideración especial.

CONCLUSIONES

La micro-cuenca cuya cobertura es Bosque nativo presenta una extraordinaria capacidad reguladora, en época de sequía, el periodo de verano es largo, cerca de siete meses, y el caudal regulado es de 6lt/s/km². El bosque nativo presenta buenas características de almacenamiento de agua en el suelo.

Las micro-cuencas dominadas por agricultura (Caparina), pastos (Panamá), con cierto grado de degradación presentan una respuesta rápida ante los eventos de precipitación, la cobertura vegetal no afecta el origen inmediato de la escorrentía, el caudal específico en época de verano es mínimo llegando valores cercanos a cero.

En los suelos de páramo caracterizados por Andosoles, existen dos micro-cuencas monitoreadas, pajonal y pinos separadas por muy poca distancia, el efecto de la cobertura es evidente, el pajonal mantiene cierto nivel de regulación de caudal en época seca mientras que los pinos consumen altos porcentajes de agua, lo que se evidencia en la escasa entrega de caudal en época seca, a pesar de estar asentado sobre un suelo de excelentes características de regulación.

El efecto de la cobertura es un factor determinante para el análisis de la respuesta hidrológica de una cuenca de montaña, características naturales de cobertura brindan un soporte adecuado a eventos extremos y regulación en épocas de verano, la intervención humana ha hecho que micro-cuencas con cambios de cobertura se degraden y pierden sus características.

Los resultados de la investigación permiten tener un conocimiento más profundo de la hidrología de sitios de alta montaña, lo cual sirve como base para establecer políticas de manejo de páramos y cuencas hidrográficas.

Se espera continuar con la investigación y seguir monitoreando las micro cuencas hasta tener una serie completa, con los eventos extremos suficientes que demuestren el verdadero efecto de la cobertura vegetal, como respuesta a eventos torrenciales, la importancia de la conservación de bosques hasta qué punto es óptimo, y cual es el rol que cumplen ante la sociedad.

Es esencial que se informe de la real magnitud que tiene una cuenca natural bien conservada para el almacenamiento de agua, y el poder de capacidad reguladora en verano, así mismo la micro-cuenca de pinos presenta excelentes condiciones de control de crecientes, pero su efecto hidrológico es totalmente contradictorio, el consumo de agua es determinante y las decisiones deben ser tomadas en base a un análisis muy profundo de todas estas consecuencias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento y sincero agradecimiento por el apoyo y la información proporcionada para esta investigación a PROTOS a través del estudio de "Modelización hidrológica de microcuencas del Cantón Cañar" llevado en conjunto con PROMAS Universidad de Cuenca.

REFERENCIAS

- [1] R.P.C Morgan, K. McIntyre, A.W. Vickers, J.N. Quinton, R.J. Rickson.(1997). A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. School of Agriculture Food and Environment, Cranfield University, Silsoe Campus, Bedford MK45, UK.
- [2] W.H. Blackburn. (1984). Impacts of grazing intensity and specialized grazing systems on watershed characteristics and responses. In: Developing strategies for rangeland management. National Research Council, Westview Press, Boulder, CO, 927-985.
- [3] I. White, M.J. Sully.(1987). Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. Water Resources Research. 23,1514-1522,.
- [4] T. Dunne, W.E. Dietrich, M.J. Brunengo. (1980) Simple, portable equipment for erosion experiments under artificial rainfall. Journal of Agricultural Engineering Research. 25, 161-168.

- [5] E. Wohl,. (2000). Mountain Rivers. Water Resource Monograph, 14. Washington DC, USA.
- [6] W. Buytaert, R. Celleri, B. De Bièvre, F. Cisneros. (2005). Hidrología del Páramo Andino: Propiedades, Importancia y Vulnerabilidad. PROMAS, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- [7] R. Hostede. (2000). Aspectos técnicos ambientales de la forestación en los páramos. En: G. Medina, C. Josse, P. Mena (Eds.) La forestación en los páramos. Serie Páramo 6. GTP/Abya Yala, Quito.
- [8] R. Hostede.(2001). El impacto de las actividades humanas sobre el páramo. En: P. Mena, G. Medina, R. Hostede (Eds.). Los páramos del Ecuador. Particularidades, problemas y perspectivas. Abya Yala/ Proyecto Páramo, Quito.
- [9] P. Willems. (2004). WETSPRO: Water Engineering Time Series Processing tool. K.U. Leuven, Hydraulics Laboratory, Belgium.
- [10] V.T. Chow, D.R. Maidment, L.W. Mays. (1994). Hidrología Aplicada. McGraw-Hill Interamericana, S.A., Bogotá, Colombia.
- [11] H.B. Mann, D.R. Whitney. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. Annals of Mathematical Statistics, 18, 50-60.
- [12] F. Wilcoxon.(1945). Individual comparisons by ranking methods. Biometrics, 1, 80-83.



Analisis de Curvas de Duracion General para Determinar el Nivel de Degradacion de Cuencas

F. Cisneros (1), C. Coello (1), y J. Feyen (2)

(1) Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, PROMAS, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador.
E-Mail: promas@ucuenca.edu.ec

(2) Department of Land Management and Economics, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Belgium.
E-Mail: Jan.Feyen@biw.kuleuven.be

RESUMEN

La degradación de cuencas hidrográficas es determinada a través de la curva de duración de caudales, definidas en siete microcuencas caracterizadas por cobertura vegetal y nivel de degradación diferentes. Tres microcuencas no degradadas y cuatro intervenidas han sido analizadas y comparadas. Las curvas de duración exponen el comportamiento hidrológico y dan cuenta de su alteración. La curva para la microcuenca de bosque natural, esta caracterizada por una regulación significativa de caudales en verano, las microcuencas de páramo presentan curvas con pendientes poco pronunciadas, signo de menor degradación, las demás curvas presentan pendientes muy pronunciadas con determinado nivel de degradación.

Palabras claves: Curva de duración, grado de degradación, respuesta hidrológica, cobertura vegetal, eventos de precipitación

INTRODUCCIÓN

El proyecto de investigación tiene por objetivo el análisis profundo de las curvas de duración de caudales determinados en siete microcuencas de la sierra ecuatoriana, cada una de ellas corresponde a un uso del suelo distinto. Tres microcuencas se encuentran en estado inalterado y sirven de testigo para el análisis del efecto de degradación de las microcuencas.

Cuatro cuencas intervenidas con diferentes actividades y diferentes grados de degradación han sido monitoreadas y construidas las curvas de duración de caudales. El análisis se realiza para tres pares de cuencas que presentan cercanía geográfica y el mismo régimen climático.

BASE CIENTIFICA

Un adecuado manejo de los recursos hídricos a escala de cuenca hidrográfica debe estar sustentado en un profundo conocimiento de los procesos hidrológicos que ocurren en ella [1]. La valoración regional en base de la curva de duración de caudales es importante para el desarrollo de los recursos hídricos en cuencas de pequeña escala. Análisis regionales con poca información tienen un alto grado de error al representar la variabilidad del régimen de caudales en pequeñas cuencas (<50 km²) [2].

Un estudio profundo del efecto hidrológico de sustituir pastos u otras cosechas cortas con árboles, reveló mediante el análisis de la curva de duración de caudales que las microcuencas analizadas se dividieron en dos grupos. Un grupo mostró un aumento sustancial del número de días de flujo cero, los flujos bajos son más afectados que altos flujos. Otro grupo mostró más reducción uniforme de flujos a través de todos los porcentajes. Las diferencias en parte pueden ser explicadas por características de almacenaje [3].

Estudios realizados acerca de la validez de las curvas de duración regionales comparados con curvas empíricas en base a pequeño rango de información reveló que existe un mejor ajuste de la curva de duración con datos limitados a largo plazo, que las curvas de duración regional [4].

La ausencia de una cobertura protectora del suelo durante una parte del año, las pendientes fuertes y otros aspectos de las prácticas agrícolas, como la labranza en la dirección de la pendiente, causan erosión acelerada y degradación en áreas con agricultura [5, 6, 7]. En los paramos, el pastoreo disminuye la porosidad de los suelos por compactación [8], aumentando el riesgo de escorrentía superficial y erosión asociada. Así mismo se han identificado tres tipos de causas mayores para la degradación del suelo del páramo: fuego, sobrepastoreo y cultivos, aunque se han identificado otros factores (construcción de carreteras, construcción y fugas de canales de riego, paso de vehículos pesados) [9].

MATERIALES Y METODOS

Las microcuencas de estudio se encuentran localizadas en la cordillera de los Andes en el Ecuador, cinco de ellas afluentes del Océano Pacífico y dos afluentes del Océano Atlántico, estas corresponden a zonas del Páramo Andino.

Para la obtención de la información hidrológica se han instalado en cada una de las microcuencas un sensor de nivel, además, se ha construido un vertedero triangular o rectangular de cresta delgada según sea la necesidad en cada microcuenca. Los datos disponibles tienen una resolución temporal de 15 min. y el rango de información varía de acuerdo a la fecha de instalación de los equipos.

Las cuencas de investigación han sido analizadas para su

caracterización completa, los suelos han sido evaluados mediante salidas de campo, recolección de muestras y análisis completos de laboratorio, la cobertura vegetal mediante análisis de fotografías aéreas y uso del SIG, los usos del suelo, el clima y los grados de alteración son inspeccionados mediante visitas de campo, los resultados resumidos de estos análisis se exponen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las microcuencas de estudio.

Grupoc	Cuenca	Área (km ²)	Cobertura	Uso del suelo
1	Lise	2.34	Matorral	Pastoreo
	Panamá	10.01	Pastos	Ganadería
	Ortigas	0.99	Bosque nativo	Bosque
2	Río Grande	3.08	Pastos, bosques, chaparro	Ganadería extensiva, Agricultura
	Caparina	5.38	Pastos	Ganadería, Agricultura
3	Pajonal	1	Pajonal	Ganadería extensiva
	Pinos	0.59	Bosque pino	Bosque

Mediante el uso de cartografía a escala 1:25000, se determinan las características morfométricas de las cuencas.

La microcuenca de Lise presenta una pendiente bastante pronunciada, este hecho influye directamente en la generación de escorrentía y en la respuesta rápida a los eventos de precipitación, de la misma manera la cuenca de Caparina tiene una pendiente relativamente baja comparandola con las demás cuencas, las respectivas curvas de duración revelan este particular.

La forma y pendiente de las curvas de duración refleja la capacidad de regulación de la cuenca vertiente, debido a condiciones naturales, o, a la regulación artificial por embalses. El extremo de los caudales superiores indica la duración de las avenidas, mientras que en el extremo de los caudales menores se puede observar, el tiempo en que cierta parte de la sección del cauce queda al descubierto, o sumergida a una determinada altura por las aguas, etc.

ANALISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de las microcuencas es necesario encontrar el caudal específico, (l/s/km²) de manera que nos permita evaluar y realizar comparaciones entre ellas, de los registros disponibles de caudal se ha extraído en la Tabla 2, un resumen hidrológico con los caudales específicos mínimos, medios y máximos, es lógico pensar que una cuenca cuya respuesta hidrológica tiene caudales específicos elevados, como respuesta a las precipitaciones, es causa de un determinado grado de degradación, así mismo caudales mínimos en épocas secas son signo de suelos pobres sin estructura o cobertura; con elevada evapotranspiración.

A pesar de la reducida información de la que se dispone de estas microcuencas, se elabora una curva de duración

Tabla 2. Características hidrológicas de la microcuencas en estudio (l/s/km²).

Grupo	Microcuenca	Q prom	Q min	Q máx
1	Lise	5.90	0.79	75.60
	Panamá	9.70	0.11	33.80
	Ortigas	16.30	5.25	95.20
2	R Grande	24.00	2.14	72.80
	Caparina	47.70	0.06	50.10
3	Pajonal	13.70	2.93	31.30
	Pinos	5.90	0.16	76.10

para cada una de ellas, con el fin de analizar su comportamiento hidrológico. La Figura 1 presenta las curvas de duración de caudales por grupos de estudio, para las alteradas, cuyo uso del suelo esta predominado por la agricultura, pastos y mixta, presentan una curva de duración con una pendiente muy pronunciada en su primer tramo, así las cuencas de Panamá, Río Grande y Caparina, presentan este comportamiento; los caudales mínimos son muy bajos y no existe una adecuada regulación del agua por intervención de la capa de suelo.

El flujo rápido esta evidenciado en la primera parte de la curva de duración presentando una fuerte pendiente, como lo manifiestan la microcuencas de Panamá en el grupo 1, así como, Caparina y Río Grande en el grupo 2, por otro lado el flujo lento se presenta en la parte final de la curva, la microcuenca de Ortigas tiene indicativos de una buena capacidad de almacenamiento de agua, con una descarga importante en época de verano. El suelo presenta condiciones de regulación de agua y controla los eventos extremos de precipitación al no presentar respuestas máximas de caudal.

La cuenca de Río Grande es bastante extensa en superficie gran porcentaje de ella, es zona de montaña; posee una cobertura mixta donde se combina la agricultura, los

pastos, matorral y bosque, de ahí el comportamiento de la curva de duración con respuestas rápidas a eventos de precipitación, y poca capacidad de regulación para el verano.

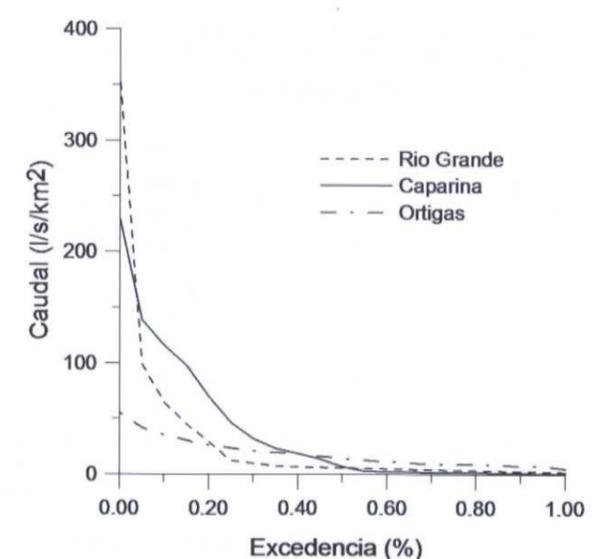
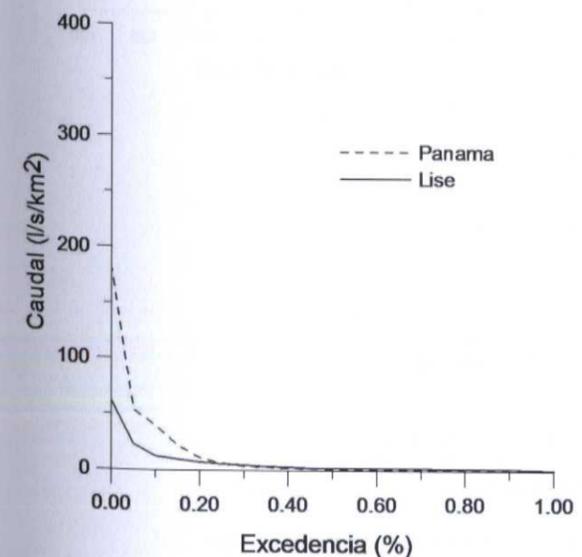
La microcuenca de Pinos en el páramo Andino, presenta una curva de duración especial, los eventos máximos son amortiguados por el bosque de pinos debido al consumo y a la evapotranspiración elevada que presenta, en época seca los caudales se reducen a valores cercanos a cero, por la misma razón esta microcuenca no presenta alteración, de ahí la forma de la curva de duración.

La cuenca de Caparina esta caracterizada por zonas inestables propensas a deslizamientos y erosión, presenta una curva de duración desfavorable a una respuesta inmediata a eventos altos de precipitación, con un coeficiente de escorrentía elevado y un caudal específico mínimo bajo, debido al periodo largo de verano.

La forma de las curvas de duración dependen de los días de caudal cero que presenten, de acuerdo a su régimen climático ninguna microcuenca ha presentado este particular, dos grupos de microcuencas (1 y 2) tienen un régimen de costa, presentando un verano largo de aproximadamente 7 meses, mientras que las cuencas de páramo (grupo 3) presentan un régimen oriental con lluvias distribuidas a lo largo del año.

Si verificamos las diferencias entre las cuencas intervenidas con actividad humana como Caparina y Río Grande, con la microcuenca de bosque nativo de Ortigas (Figura 1), se observa muy baja capacidad de almacenamiento de agua para las cuencas intervenidas. Las cuencas del páramo andino (Grupo 3) presentan curvas semejantes, la variación se da en el volumen regulado que es mayor para la cuenca de pajonal.

Cuando se visualizan las frecuencias de la respuesta hidrológica de las microcuencas, se observa como las



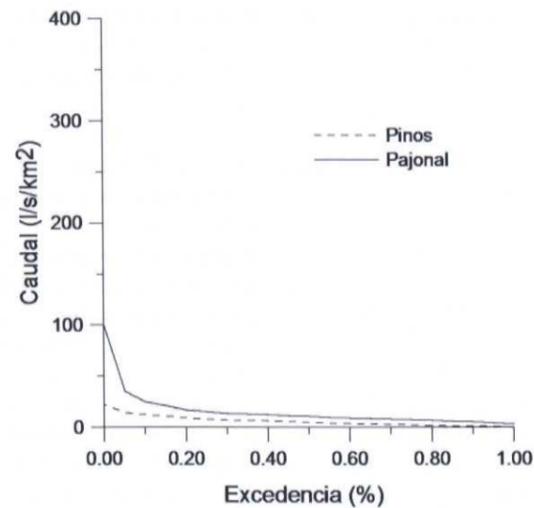


Figura 1. Curvas de duración para las microcuencas en estudio.

microcuencas con intervención no tienen capacidad de soporte para lluvia de intensidad fuerte, como se indica en la Figura 2, no presentan frecuencias regulares en el rango de máximo caudal comparado con el caudal medio, las cuencas testigo si soportan un evento extremo de precipitación y lo regulan de manera eficiente, así las frecuencias mantienen cierta regularidad en todo el rango de caudales.

Las microcuencas de los grupos 1 y 2 presentan régimen climático de costa cuyo periodo de verano es extenso, los caudales bajos son dominantes durante todo el año y los máximos se presentan por periodos cortos durante el invierno, si bien no presentan días de flujo cero, se explica el comportamiento de las frecuencias de caudales indicadas en la Figura 2.

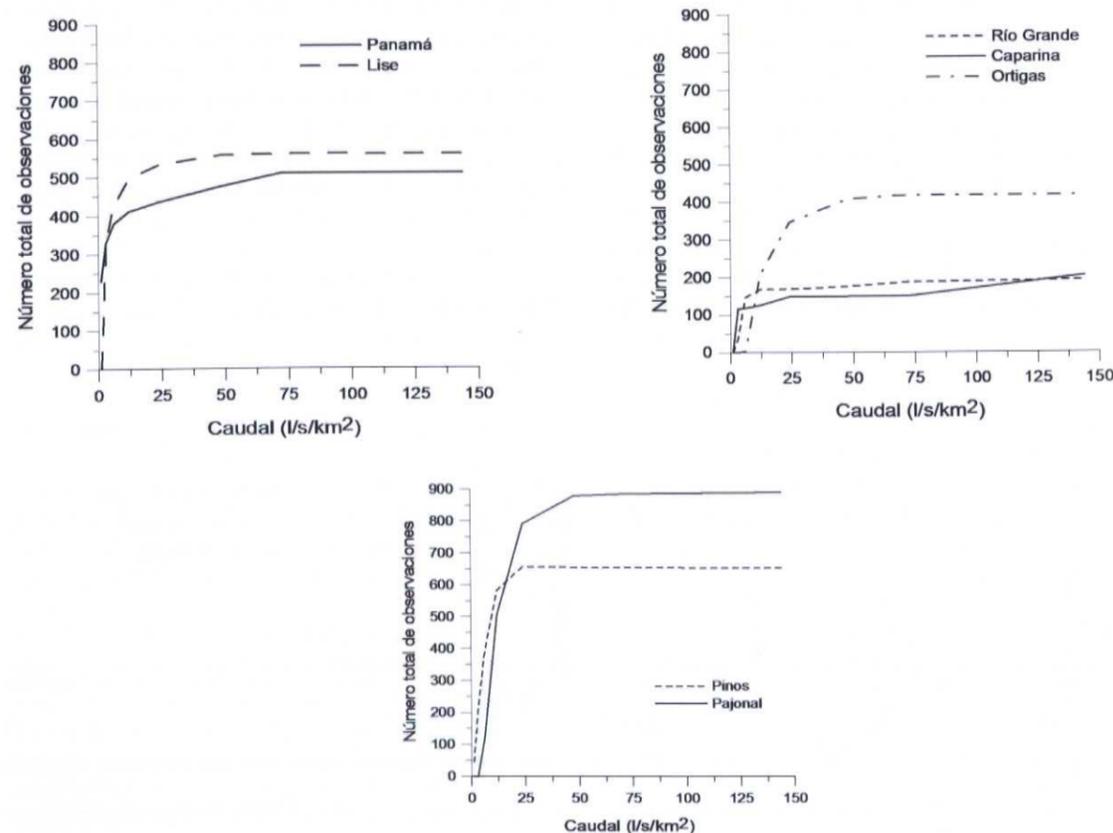


Figura 2. Frecuencias de caudales en las microcuencas por grupo de estudio.

Una manera de evaluar el grado de alteración de una cuenca hidrográfica, es a partir del concepto IQB (índice de caudal base), el cual relaciona la respuesta media de la cuenca con su caudal base promedio, esta medida varía desde cero a uno y mientras mas cercano esté con la unidad, la cuenca presenta buenas características de conservación. La Tabla 3 ilustra este análisis y se ha calificado a esta cuenca de acuerdo a este criterio.

Tabla 1. Características de las microcuencas de estudio.

Grupo	Cuenca	Q medio (l/s)	Q base (l/s)	IQB	Degradación
1	Panamá	97.0	27.0	0.28	Moderada
	Lise	14.6	6.2	0.43	Leve
2	Ortigas	22.6	15.3	0.68	No existe
	Caparina	196.2	70.9	0.36	Moderada
	Río Grande	260.0	43.8	0.17	Alta
3	Pajonal	13.8	8.2	0.59	No existe
	Pinos	3.8	1.8	0.47	Leve

Las cuencas testigo para cada uno de los grupos de estudio han sido calificadas sin, o leve degradación en el caso de Lise, para las cuencas intervenidas se ha otorgado diferentes escalas de calificación, siendo la mas afectada la microcuenca de Río Grande, manifestándose con alto grado de degradación.

CONCLUSIONES

Las cuencas intervenidas presentan diferente grado de degradación de acuerdo a las curvas de duración que se ratifican con las características reales de las microcuencas, la más afectada es Río Grande que tiene un alto

porcentaje de suelo infértil abandonado, con presencia de suelos muy erosionados, así mismo Caparina y Panamá son cuencas alteradas donde la agricultura y el mal manejo de los suelos, han provocado suelos con bajos índices de infiltración y por ende respuestas inmediatas a los eventos de precipitación.

Las curvas de duración de caudales revelan ser un método confiable que permite analizar las características básicas de cuencas hidrográficas, una cuenca de montaña degradada presenta el primer tramo de la curva de duración, prácticamente vertical, llega a valores muy bajos en época de verano. Para la microcuenca de bosque nativo la curva de duración, se parece a las curvas para cuencas de llanura con una pendiente suave al principio y con caudales altos en verano.

Qué importante resulta la conservación de cuencas no intervenidas, la degradación una vez alcanzado cierto nivel ya no es recuperable, se prolonga aceleradamente, las consecuencias hidrológicas pueden ser devastadoras, no son capaces de controlar eventos máximos de precipitaciones y las posibles consecuencias de inundaciones y destrucción están presentes, por otro lado en época seca la escasez de agua puede ser más peligrosa, la falta de agua para riego y/o consumo humano puede generar problemas sociales profundos.

A todo esto se suman también las pobres características de estructura de los suelos degradados, que no permiten realizar actividades agrícolas eficientes, las consecuencias del mal manejo de los suelos conlleva a todos estos problemas, tanto ambientales como socio económicos, muy graves. Se vuelve entonces necesario un cambio de actitud en la gente y priorizar las actividades de conservación y un adecuado manejo del recurso suelo para evitar consecuencias futuras de las cuales podamos lamentarnos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento y sincero agradecimiento por el apoyo y la información proporcionada para esta investigación a PROTOS a través del estudio de "Modelización hidrológica de microcuencas del Cantón Cañar" llevado en conjunto con PROMAS Universidad de Cuenca.

REFERENCIAS

- [1] K. Beven.(1997) Rainfall-Runoff: The Primer. John Wiley & Sons, London.
- [2] A. Ioannis Niadas.(2005) Regional flow duration curve estimation in small ungauged catchments using instantaneous flow measurements and a censored data approach. *Journal of Hydrology*, 314(1-4), 48-66.
- [3] P.N.J Lane, A E. Best, K. Hickel, L. Zhang. (2005). The response of flow duration curves to afforestation. *Journal of Hydrology*, 310(1-4), 253-265.
- [4] Montanari, A. Brath. (2004). Regional flow-duration curves: reliability for ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 27(10), 953-965.

- [5] M. Dehn. (1995) An evaluation of soil conservation techniques in the Ecuadorian Andes. *Mountain Research and Development*, 15(2),175-182.
- [6] C.P. Harden. (1993a) Land use, soil erosion, and reservoir sedimentation in an Andean drainage basin in Ecuador. *Mountain Research and Development*, 13(2),177-184.
- [7] C.P. Harden. (1993b) Upland erosion and sediment yield in a large Andean drainage basin. *Physical Geography*, 14(3), 254-271.
- [8] R. Hofstede. (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in colombian páramo grasslands. *Plant and Soil*, 173(1), 111-132.
- [9] P. Podwojewski, J. Poulenard, T. Zambrana, R. Hofstede.(2002). Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18, 45-55.



Variabilidad Espacio-Temporal de la Producción de Sedimento en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute

E. Pacheco (1), F. Cisneros (1),
D. Mora (1), B. De Bièvre (1-2)
y G. Govers (2)

(1) Programa para el Manejo del Agua y del Suelo,
PROMAS, Universidad de Cuenca,
Cuenca, Ecuador.
E-Mail: promas@ucuenca.edu.ec

(2) Laboratory for Geomorphology and Regional Geography,
Katholieke Universiteit Leuven K.U.Leuven,
Leuven-Belgium.
E-Mail: gerardgovers@geo.kuleuven.be

RESUMEN

La importancia de la cuenca del río Paute radica en la generación de aproximadamente el 50% de energía hidroeléctrica para el país. La intervención humana, su geomorfología, la variabilidad de suelos y la no uniforme distribución espacial y temporal de precipitación, contribuyen a la persistencia de procesos erosivos traducidos en permanente producción de sedimento. Es desconocida la variación temporal y el aporte real de subcuencas de importancia. El presente estudio establece, mediante el análisis de batimetrías y medición de sedimento retenido y en suspensión, una tasa global de $105 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ y variaciones de hasta $336 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Palabras claves: Producción de sedimentos, sedimento en suspensión, cuencas de montaña, batimetría.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas tropicales han sido sometidos a considerables cambios por deforestación para implementación de tierras dedicadas a cultivos y pastos. De manera particular, en las zonas de montaña se requieren esfuerzos para el entendimiento de los procesos de degradación, que permitan la elaboración de estrategias adecuadas para el manejo sostenible del recurso tierra.

La cuenca hidrográfica del río Paute ubicada en el sur de los Andes del Ecuador, posee una superficie de $5,176 \text{ Km}^2$. Los procesos erosivos de naturaleza hídrica y de movimientos de masa, han resultado en una considerable producción de sedimento y una continua degradación de tierras y de la cobertura vegetal dentro de la cuenca. Las características de un rápido transporte en el sistema de drenaje y entrega de sedimento al río Paute ocasionan una rápida disminución de la capacidad de almacenamiento del embalse de Amaluza, parte del complejo hidroeléctrico Paute, de tal forma que en un lapso de 15 años acumularía un volumen de aproximadamente 44.5 millones de m^3 de sedimento.

BASE TEÓRICA

La erosión de suelo es un extenso fenómeno en el sur de los Andes ecuatorianos, donde existen amplias zonas cubiertas por suelos sedimentarios y de origen volcánico; aproximadamente la mitad de la superficie de las cuencas hidrográficas interandinas son afectadas por procesos de degradación de tierra. En las partes altas, el ecosistema denominado como páramo, poseen suelos con un alto contenido de materia orgánica y elevadas tasas de infiltración, existe baja escorrentía y baja erosión. Por otro lado se ha establecido (Podwojewski, et al., 2002; Buytaert, et al., 2004) que la perturbación de estos suelos por pastoreo y quema causan una disminución en su materia orgánica de manera crítica, al influir sobre las propiedades hidrofísicas, volviéndolos potencialmente erosionables. De manera particular en la cuenca hidrográfica del río Paute, se ha sugerido que los impactos antropogénicos estarían aumentando considerablemente los procesos de erosión en comparación con los factores naturales. Para el entendimiento de los procesos de erosión y dinámica de producción de sedimento para topografías de montaña se debe considerar que por un lado, las dificultades que se presentan por la escala de análisis, y por otro lado los factores que influyen en los procesos. La litología juega un papel determinante, sobre todo tratándose de materiales de origen sedimentario y volcánico, ya que en el proceso de erosión se encuentra involucrado el rompimiento y transporte de las partículas del suelo por impacto y por escorrentía, lo cual está relacionado con la intensidad de precipitación y la pendiente. Se han efectuado algunos estudios con referencia a los efectos de diferentes pendientes o intensidad de precipitación en los procesos de erosión (Romkens, et al., 2002). Sin embargo, para suelos tropicales no son conocidas de manera satisfactoria las relaciones existentes debido a las peculiaridades producto de altitud, pendiente, morfología. De manera general la pendiente afecta la infiltración en la medida que aumenta con la intensidad de precipitación. Para condiciones similares de intensidad, menor escorrentía se produciría para pendientes más pronunciadas (Assouline, 2006), puesto que aunque el sellado de la superficie complica los procesos de erosión, se establece (Poesen, 1987) que la infiltración se incrementa debido a que el sellado se vuelve menos intenso. Así también la concentración de sedimentos se incrementa con un aumento en intensidad de lluvia en las primeras etapas del proceso de escorrentía superficial. Para litologías arenosas, se establece que para pendientes superiores a 25% la erosión cambia del proceso de transporte al de rompimiento de partículas (Assouline, 2006).

La erosión por cárcavas es considerada como la más importante y en muchos casos dominante proceso de entrega de sedimentos a los cauces (Olley, et al., 2003; Valentin, et al., 2005). Se asume que los factores de orden antropogénico y factores y condiciones hidro-climáticas serían las causas más importantes para cambios en distribución e intensidad de erosión y de producción de

sedimentos. Durante la segunda mitad del siglo 20; se ha estimado (Pedkov, et al., 2006) para Sudamérica una producción de sedimentos específica de alrededor de 72 t ha⁻¹, y aunque a los factores naturales les corresponde un 80%, los factores de orden antropogénico habrían producido un incremento de producción de sedimento del orden de 20%. Adicionalmente se ha estimado que el porcentaje de superficie que presenta tendencia a incremento de producción de sedimentos para Sudamérica es del orden de 89%.

En este sentido, si bien se ha establecido que para la cuenca del río Paute el porcentaje de superficie con algún grado de erosión es elevado (UMACPA, 1996), y aunque se haya identificado que la cuenca media produce la casi totalidad de sedimentos, es incierta la distribución de dicha cantidad a lo largo del año, más desconocida aún es la variación existente dentro del ámbito geográfico, disponiéndose únicamente de estimaciones para tasas de erosión sobre superficies globales (UMACPA, 1996), para las tres principales subcuencas con mayor degradación: Jadán, Burgay y Gualaceo.

Lo indicado resalta la complejidad de los procesos de erosión y producción de sedimentos para cuencas hidrográficas de montaña, y la dificultad para lograr una caracterización completa y adecuada, más aún, si a esto se suma el hecho de la falta de información apropiada sobre medición y monitoreo de parámetros. Sin embargo se ha propuesto analizar los cambios y variaciones de cantidades de producción de sedimentos, en un intento por establecer los rangos a los que esta sujeta la variabilidad a nivel de cuenca hidrográfica, para de esta manera dar paso a futuros esfuerzos encaminados a un entendimiento más profundo. El presente trabajo tiene como objetivo propiciar un aporte al entendimiento de los procesos de erosión en cuencas hidrográficas de montaña, mediante, (i) el análisis de la variabilidad espacial y (ii) el análisis de la variabilidad temporal de la producción de sedimento.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio está localizada al sur de los Andes del Ecuador y comprende la cuenca hidrográfica del río Paute, con una extensión de 5,176 Km². La importancia radica en la producción de aproximadamente el 50% de energía hidroeléctrica para el país a través del proyecto de 1,200 Mw, que incluye el embalse de Amaluza. La zona media de la cuenca se encuentra densamente poblada, lo cual sumado a la baja productividad agrícola ocasiona una demanda adicional de recursos, sobre todo de las zonas altas, existiendo en la actualidad un avance de la presión por encima de los 3,000 m s.n.m.

La región presenta una estructura geomorfológica determinada por las dos cordilleras andinas de orientación

meridiana, los relieves transversales que entrelazan las cordilleras y la gran fosa de hundimiento. A este esquema morfo-genético, se suman las acciones de una morfo-dinámica pasada (acciones glaciares e hídricas) y actual (procesos hídricos, movimientos en masa y de gravedad). En las zonas secas de la parte central y baja, se producen precipitaciones de gran intensidad, que causan serios problemas morfo-dinámicos de carácter hídrico que propician la formación de cárcavas y barrancos. Las partes altas de la cuenca y los flancos interiores de las dos cordilleras andinas, no se encuentran mayormente afectados por procesos dinámicos de naturaleza hídrica. El clima corresponde a una región ecuatorial de altura con temperaturas casi constantes a lo largo del año y con variaciones considerables durante el día. La temperatura media anual para la cuenca media va desde 15 °C a 17 °C y disminuye a razón de 0.65 °C por cada 100 m de elevación. La precipitación anual varía entre 730 mm y 850 mm a aproximadamente 2,500 m.s.n.m. La distribución de la precipitación a lo largo del año se caracteriza por una marcada estacionalidad bimodal. En el valle interandino se presentan eventos esporádicos de alta intensidad caracterizados por una variación tanto espacial como temporal considerable.

Retención de sedimento en diques

Se efectuó la medición de material retenido en 52 diques de gaviones, emplazados en cárcavas y torrentes para 13 zonas de la cuenca media, con diferentes condiciones litológicas y de cobertura. Las estructuras forman parte de un proyecto para manejo y conservación ejecutado en el período 1987 - 1998. Dichas obras en su mayoría han sido colmatadas por material en un tiempo no mayor a un año contados desde la fecha de su construcción.

$$SL_D = \frac{V_D \cdot \rho_{SD}}{T} \quad (1)$$

La carga anual de sedimento depositado SL_D (t a⁻¹) es: En donde: V_D es el volumen depositado en los diques (m³), ρ_{SD} es el peso específico aparente (g cm⁻³), T es el tiempo establecido para llenado de los diques (años).

El volumen de material retenido V_D es calculado a través del levantamiento de la topografía y una reconstrucción del cauce original, con perfiles longitudinales medidos antes del emplazamiento de las obras. La densidad aparente ρ_{SD} es determinada mediante toma de muestras inalteradas. Para determinar el lapso de tiempo en el cual son llenados los sitios de estudio, se realiza entrevistas a informantes claves. La producción específica de sedimentos SSY (t ha⁻¹ a⁻¹) es calculada sobre la superficie total A_T (ha) y sobre la superficie del área degradada A_D (ha).

La superficie del área degradada en cada zona es determinada mediante delimitación en campo o con el mapa de cobertura, desarrollado mediante el análisis espacio-temporal de cambios con un mapa de 1986 y un mapa de 2001-2002, elaborados a través de cuatro imágenes Landsat, dos imágenes históricas y dos imágenes actuales del mismo ciclo de crecimiento (dos imágenes Landsat ETM+ de 03/11/01 y 12/04/02, una imagen Landsat MSS de 15/09/86, y una imagen Landsat TM de 23/03/86). Este análisis indica un incremento en superficie de clase "erosión-urbano" de 4.3%, a un porcentaje actual de 7.8% de la superficie total de la cuenca que equivale a 40,000 ha.

Monitoreo de sedimentos en suspensión

Se realiza monitoreo de carga de sedimento en suspensión y caudal, mediante la implementación de estaciones de muestreo y medición automática ISCO 6712. Se establece la relación entre caudal líquido y de sólidos en suspensión, y se determina la cantidad anual de sedimento. El monitoreo se realiza en cuatro sitios de la cuenca media (Tabla 1) de los cuales el indicado con el nombre de Turupamba, corresponde a condiciones de relativa conservación con respecto de los otros que son considerados, como áreas con elevada producción de sedimentos.

Tabla 1. Sitios para monitoreo de sedimento en suspensión

Subcuenca	Área total (ha)	Monitoreo (meses)
Jadán	29,950	23
Turupamba	531	20
Mapayacu	397	8
Cachihuayco	147	10

Información batimétrica

Para el análisis de la variabilidad anual de la producción de sedimentos en la cuenca hidrográfica del río Paute, se procesa información correspondiente al período 1983-2005, para las mediciones batimétricas realizadas en el embalse de Amaluza que se encuentra emplazado a la salida de la cuenca y para dos embalses en el período 1994-2005, formados a partir de un deslizamiento de magnitud considerable suscitado en 1993 que represó las aguas del cauce principal. Para la determinación de sedimentos totales provenientes de la cuenca, se ha incluido en el balance los volúmenes correspondientes a operaciones de dragado realizadas durante el período 1991-2005. Este método, relativamente simple, permite obtener información de la cantidad total de sedimentos que se produce en una cuenca, ya que incorpora tres formas de erosión hídrica: (a) erosión laminar y por surcos, (b) erosión por cárcavas y (c) erosión de fondo. Para relacionar la producción de sedimento que se deriva de las mediciones batimétricas con el comportamiento

hidrológico de la cuenca, se ha considerado la serie histórica de caudales mensuales del período de observación 1983-2005, que corresponden a la superficie de drenaje total. Con el objetivo de suavizar la variabilidad y de detectar una posible tendencia, se realiza la transformación de la información a promedios continuos de cinco años.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Variación estacional

Variación estacional de producción de sedimento fue observada en las subcuencas monitoreadas, de esta manera, en la subcuenca del río Jadán, durante el período de observación de 2 años, se establece que una cantidad de 295,000 t (94% del total anual) se produce desde noviembre a mayo con concentraciones de hasta 16.4 g

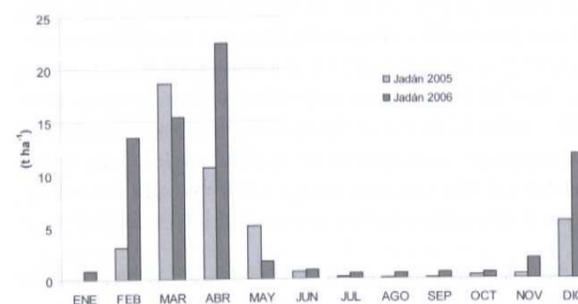


Figura 1. Variación estacional. Distribución de la producción de sedimento para el río Jadán (período 2005-2006).

1-1. Esta variación estacional puede reflejar la respuesta que tienen las áreas en erosión, luego de terminada

estación seca, debido a los factores naturales y de origen antrópico.

Variación espacial

La medición de sedimento atrapado en diques de gavión, arroja los resultados que se indican en la Tabla 2. Aún, considerando que las estimaciones hechas para producción de sedimento por el método empleado estarán sujetas a una variación del orden de 50% (Verstraeten, et al., 2002), se observan valores considerables en Cachi-huayco (arenisca, 205 t ha⁻¹ a⁻¹) y Cachi (lutitas, 213 t ha⁻¹ a⁻¹). El valor más bajo determinado correspondiente al sitio denominado Llayshatán, refleja un buen estado de conservación. La variación de tasa de producción de sedimento entre los sitios de estudio para las 13 zonas de la cuenca media se establece en el orden de 208 t ha⁻¹ a⁻¹.

Por otro lado, los resultados obtenidos mediante el monitoreo de sedimento en suspensión indican una variación de producción específica dentro de la cuenca media en el rango de 336 t ha⁻¹ a⁻¹ (Tabla 3).

Producción anual de sedimento

Se establece una producción anual media de 2.4 Hm³ (desviación estándar de 0.94) equivalente a aproximadamente 3,600,000 t de sedimento depositado proveniente de la cuenca. El análisis de sedimento depositado y extraído en el embalse de Amaluza indica que durante el período 1983-2005 existe una ligera tendencia de incremento en la tasa anual de producción de sedimento de 52,200 t. Si bien se sugiere cierta correspondencia entre sedimento depositado y flujo anual, resulta más importante resaltar la invariabilidad del flujo medio anual proveniente de la cuenca en estudio, durante el período de

Tabla 2. Variación de producción de sedimento por medición de sedimento retenido.

Sitio	Cuenca	Σ V _D (m ³)	ρ _{SD} (g cm ⁻³)	T (años)	A _T (ha)	SSY _{AT} (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	A _D (ha)	A _D /A _T %	SSY _{AD} (t ha ⁻¹ a ⁻¹)
Autopista	Burgay	1503.6	1.31	5	3.84	102.64	2.74	71.3	143.9
Cachihuayco	Burgay	20044	1.30	1	147.2	177.03	126.72	86.1	205.6
Llayshatán	Burgay	3.5	1.24	5	7.2	0.12	0.17	2.3	5.1
Macas	Burgay	744.6	1.58	3	3.9	100.51	2.40	61.5	163.5
Mesaloma 1	Burgay	101.1	1.23	6	1.75	11.85	0.30	17.4	68.2
Mesaloma 2	Burgay	113.1	1.17	4	1.9	17.44	0.24	12.6	138.4
Turupamba	Burgay	7447.7	1.27	1	531.0	17.81	76.23	14.4	124.1
Solano	Burgay	2833.7	1.41	1	386.8	10.33	172.35	44.6	23.2
Siguancay	Jadán	3155.0	1.17	1	1932.1	1.91	155.07	8.0	23.8
Peste	Gualaceo	1559.8	1.10	1	678.51	2.53	83.52	12.3	20.5
Agupancay	Gualaceo	2651.0	1.10	1	1581.1	1.84	203.76	12.9	14.3
Cachi	Jadán	5883.0	1.25	1	71.73	102.52	34.47	48.1	213.3
Salado	Jadán	502.0	1.41	1	50.13	16.65	36.40	72.6	22.0

Tabla 3. Variación de producción de sedimento en la cuenca media.

Sitio	A _D (ha)	Sedimento medido (m ³)	Sedimento medido (t)	Volumen anual (m ³ a ⁻¹)	Sedimento anual (t a ⁻¹)	Producción específica (m ³ ha ⁻¹ a ⁻¹)	Producción específica (t ha ⁻¹ a ⁻¹)
Turupamba	88.1	193.5	270.9	290.2	406.3	3.3	4.6
Jadán	5,306.4	437,818.0	612,945.2	228,426.7	319,797.4	43.0	60.2
Mapayacu	60.0	7,525.2	10,535.3	11,287.7	15,802.9	188.1	263.3
Cachihuayco	126.7	25,725.1	36,015.2	30,870.1	43,218.2	243.6	341.0

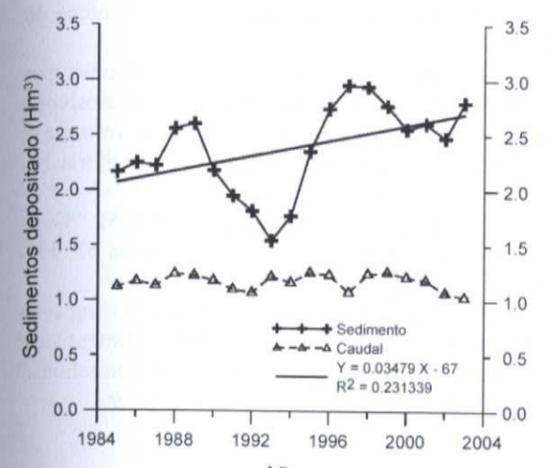


Figura 2. Variación anual. Sedimento depositado en embalses y flujo medio anual para promedios continuos de 5 años.

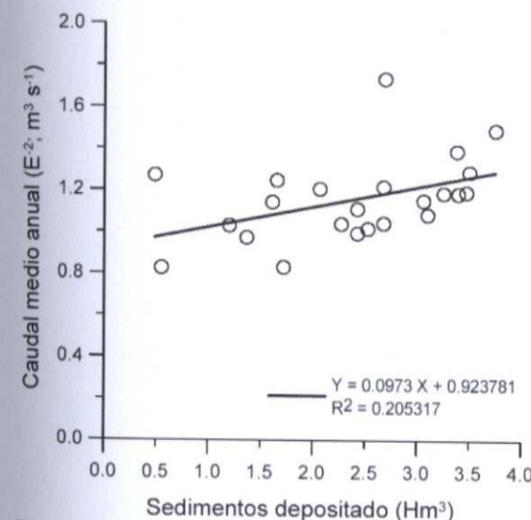


Figura 3. Variación anual. Correspondencia entre volumen de sedimento depositado y caudal medio anual.

análisis (Figuras 2 y 3).

No se ha logrado establecer el porcentaje anual que representa el aporte de las áreas con activa producción de sedimento, en la cuenca media sobre la cantidad total proveniente de la cuenca hidrográfica, debido a que se

desconoce la superficie neta de dichas zonas. Por otro lado, y considerando que del análisis de cobertura se desprende que a superficie bajo erosión corresponde aproximadamente el valor de 34,000 ha, se puede establecer que la tasa de erosión calculada en la cuenca hidrográfica del río Paute con respecto a la superficie con erosión, supera la tasa de 105 t ha⁻¹ a⁻¹.

CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis de la distribución espacial y temporal de la producción de sedimentos en la cuenca hidrográfica del río Paute. De los resultados obtenidos se concluye principalmente:

i) Si bien la producción de sedimento en su casi totalidad proviene de la cuenca media de estudio, existe una gran variabilidad de valores en los sitios analizados encontrándose en áreas específicas y con condiciones hidrológicas puntuales tasas de hasta 341 t ha⁻¹ a⁻¹ (Cachihuayco).

ii) Valores del orden de 90% de la producción total se darían durante la época lluviosa, y en contados eventos con intensidades variables, de las cuales entre 40% y 50% tienen valores de hasta 25 mm h⁻¹.

iii) Se establece para la cuenca, una tasa de producción de sedimento referida a superficie erosionada, del orden de 105 t ha⁻¹ a⁻¹.

iv) Para un período de análisis de 22 años, se establece una ligera tendencia de aumento en la cantidad anual de producción de sedimento, a pesar de un comportamiento del régimen de flujo anual sin variación apreciable.

v) Considerando el incremento en superficie con erosión de, en el período de 1986 a 2002, que resulta del análisis de imágenes satelitales, y tomando en cuenta el relativo incremento en tasa anual de producción al fin de la cuenca, se concluye que los efectos de orden antropogénico no logran influir de manera significativa aún. Si bien no se puede negar el aumento de impactos sobre el uso de tierra, resultaría que los factores de origen natural son los que estarían predominando en la dinámica de producción de sedimento en la cuenca del río Paute, lo cual concor- daría con las estimaciones realizadas para Sud-américa.

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo forma parte de los resultados del proyecto: "Towards integrated catchment management in tropical mountain areas: the problem of sediment management, Paute catchment, Ecuador" VLIR O.I. ejecutado mediante cooperación entre el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS-Universidad de Cuenca y K. U. Leuven - Bélgica.

BIBLIOGRAFÍA

- Assouline S. (2006). "Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing." *Catena* 66, 211-220.
- Buytaert W., B. De Bièvre, G. Wyseure, J. Deckers. (2004). "The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of land use changes on the hydrology of catchments in the Ecuadorian Andes." *Hydrology and Earth System Sciences* 8, 108-114.
- Olley J., R. Wasson. (2003). "Change in the flux of sediment in the Upper Murrumbidgee catchment, southeastern Australia, since European settlement." *Hydrological Processes* 17, 3307-3320.
- Pedkov A.P., A.V. Gusarov. (2006) "Suspended sediment yield from continents into the World Ocean: spatial and temporal changeability." *IAHS* 306, 3-11.
- Podwojewski P., J. Poulencard, T. Zambrana, R. Hofstede (2002). "Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador)" *Soil Use Manage.* 18, 45-55.
- Poesen J. (1987). "The role of slope angle in surface seal formation". Gerdner, V. (Ed), *Proc. of the 1st International Conference on Geomorphology, Resource Environment and Developing World*. John Wiley and Sons: New York, pp. 437-448.
- Romkens M.J.M., K. Helming, S.N. Prasad, (2002). "Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness and soil water regimes." *Catena* 46, 103-123.
- UMACPA. (1996). Informe del Estudio geomorfológico de la dinámica de los procesos erosivos y de sedimentación en la cuenca del Río Paute. Informe de consultoría para Proyecto, Contrato de consultoría No. 4CO-003-96, Cuenca, Ecuador.
- Valentin C., J. Poesen, Y. Li. (2005). "Gully erosion: impacts, factors and control." *Catena* 63, 132-153.
- Verstraeten G., J. Poesen. (2002). "Using sediment deposits in small ponds to quantify sediment yield from small catchments: possibilities and limitations." *Earth Surf. Process. Landforms* 27, 1425-1439.



Reconstrucción de Eventos Hidrológicos Extremos Utilizando Herramientas de Modelación: Caso Río Chanchán, Fenómeno Del Niño 1982-1983, Ecuador

C. Coello, A. Alvarado, F. Cisneros.

Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, PROMAS, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador. E-Mail: promas@ucuenca.edu.ec

RESUMEN

El fenómeno del Niño ocurrido durante los años 1982-1983 fue considerado como uno de los más fuertes del último siglo, los registros de las precipitaciones durante estos años alcanzaron umbrales que superaron significativamente los 100 años del periodo de retorno. Esta investigación se centra en la reconstrucción de la crecida que causó la destrucción de una estación hidrológica ubicada unos kilómetros aguas abajo de la población de Huigra, ese día se registraron precipitaciones de 400mm en la parte alta de la cuenca del río Chanchán, y originaron un caudal de 235m³/s de acuerdo a la reconstrucción realizada con el modelo hidrológico MIKE 11, dicho caudal fue suficiente para provocar la destrucción parcial de la población de Huigra.

Palabras claves: Eventos de precipitación, creciente, periodo de retorno, MIKE 11, ecuación de Manning

INTRODUCCION

Los Niños de 1982- 83 y 1997-98 han sido los más fuertes del siglo. Los estudios realizados durante la cooperación INAMHIIRD sobre la influencia de El Niño en las precipitaciones del Ecuador, destacan que durante los años 1982-83 se produjo en el océano Pacífico un evento excepcional de ese fenómeno que se expresó en Ecuador con precipitaciones también excepcionales sobre la vertiente occidental de la cordillera de Los Andes, cuyos aumentos significaron entre 50 y 1.000% de la media de los años normales (Rossel, 1997).

Estas lluvias correspondieron a períodos de retorno excepcionales que superaron significativamente los 100 años para los totales anuales registrados

Durante 1982-83 la precipitación en la zona interandina y amazónica no mostró una relación directa con El Niño, a pesar de haber presentado niveles ligeramente superiores a los normales. La cordillera occidental contribuye a reducir sensiblemente la influencia de las masas de aire del Pacífico e inclusive puede anular la influencia.

El análisis de la distribución geográfica de las precipitaciones refleja no sólo los niveles positivos extremos en las zonas más áridas, sino una disminución de las anomalías de sur a norte, cuando se aproximan a la cordillera de Los Andes tal como se indica en La Figura 1.

El total anual excedentario para ese Niño estuvo determinado por dos condiciones: la multiplicación por dos o tres de los totales mensuales de la estación de lluvias y la extensión del período de lluvias de octubre de 1982 a agosto de 1983.

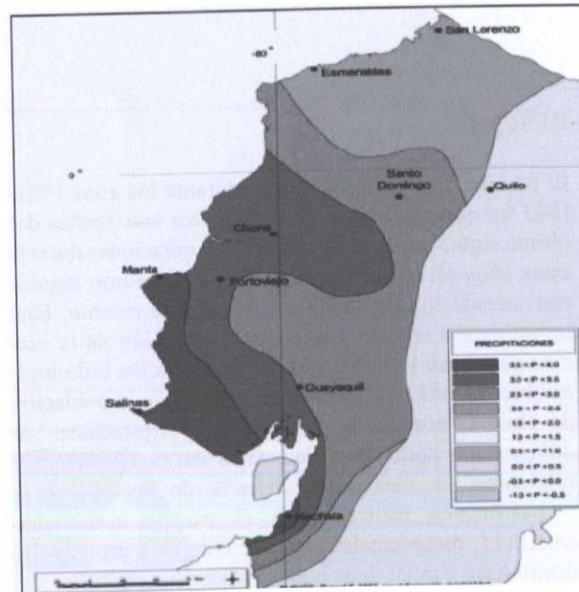


Figura 1. Ecuador. Anomalías estacionales de lluvias durante El Niño 1982-83. Fuente: CAF.

Una característica particular de este evento extremo fue presentar todas las condiciones anómalas del océano y la atmósfera por lapsos muy largos: fuerte calentamiento del mar, fuertes anomalías de vientos del suroeste; fuertes anomalías de la temperatura superficial del mar y de los vientos del oeste.

EL SISTEMA HIDROGRÁFICO DEL RÍO CHANCHÁN

La cuenca del Río Chanchán tiene un área de drenaje de 1409Km², se encuentra ubicada en la parte central de la Región Andina del Ecuador, afecta las provincias de Chimborazo, Guayas, Bolívar y los Ríos. El punto más alto de la cuenca corresponde al Cerro Gallo Rumi con una altitud de 4513.8 m.s.n.m., se encuentra sobre la Cordillera Occidental, la zona más baja de la cuenca se localiza en la población de Cumandá ubicada en la parte oeste de la misma, en la confluencia del Río Chanchán con el Río Azul con una altitud aproximada de 330 m.s.n.m.

El Río Chanchán es parte del sistema hídrico de la cuenca del Río Guayas, el cual desemboca en el Océano Pacífico, y se caracteriza por presentar flujo supercrítico altamente turbulento la mayor parte del tiempo y en las zonas altas de la cuenca, mientras que en la zona media y baja se presenta generalmente flujo subcrítico turbulento. Las crecidas o avenidas del Río Chanchán, que ocurren generalmente durante el invierno, se producen súbitamente en intervalos de tiempo relativamente cortos, registrándose aumentos de nivel del orden de 1 m. en un tiempo aproximado de 1 minuto y velocidades de la corriente mayores a 4 m/s. Durante el fenómeno del Niño del 97 se produjo el embalsamiento del río Chanchán el cual produjo la incertidumbre de las poblaciones cercanas como Huigra. Afortunadamente el desfogue días después no causó mayores daños materiales ni humanos.

MATERIALES Y METODOS

La reconstrucción de la crecida del río Chanchán en el año 1982 es de importancia fundamental para predecir el caudal máximo producido en los últimos 60 años, mediante trabajo de campo se logra levantar algunas secciones del río en un tramo aproximado de 600m, estas secciones son utilizadas para estimar el caudal originado en el fenómeno del niño de 1982 que ocasionó innumerables pérdidas humanas y económicas. Es considerado el fenómeno más extraordinario de las últimas décadas.

Recopilación de Información.

De varias fuentes se recopila información muy valiosa que permite establecer los niveles a los que había llegado la crecida ocurrida a finales de 1982 donde se produjeron precipitaciones de 402mm en la zona alta de la cuenca, en el sector conocido como Pachamama (INAMHI, Anuarios), así mismo se determina la gran socavación producida en la superficie del cauce a lo largo de las

últimas décadas. La participación de la comunidad de Huigra mediante sus testimonios fue fundamental para realizar esta investigación.

Una gran cantidad de testimonios fue recopilada, los resultados de estas entrevistas fueron muy importantes para determinar con mayor exactitud la creciente ocurrida a finales de 1982.

Testimonios:

Secretario de la Junta Parroquial: Sr. Silvio Tamayo



Sr. Silvio Tamayo

“La historia del río Chanchán es extensa, grandes inundaciones se han producido desde inicios del siglo pasado, la más recordada últimamente es la del 20 de Octubre de 1982, que se presume fue la mayor creciente producida en ese río cuyo nivel llegó hasta la parte alta de los muros construidos en la orilla izquierda”, comenta que por esa crecida el cauce del río se profundizó cerca de 1.50m, a partir de esta crecida se construye el muro al lado derecho que soportó la crecida del invierno de 1982. Recuerda que en la década de los 60 el cauce del río se



Sr. Jorge Peñafiel

localizaba unos 4m por debajo del cauce actual. Estuvimos ubicados en el puente peatonal aguas arriba del puente metálico de Huigra a unos 150m, sector donde vive el Sr. Silvio Tamayo, supo indicar el nivel al cual llegó el río para la crecida máxima de duración aproximada de dos horas que él recuerda en el 82, existe actual-

mente un agujero en el muro a la orilla izquierda, que sirvió de referencia para ubicar el nivel máximo de crecida.

Jefe político de Huigra: Sr. Jorge Peñafiel

El Sr. Peñafiel al ser una persona joven no recordó con mayor detalle el efecto de las crecidas en Huigra, sin embargo fue de gran colaboración cuando recorrimos el pueblo, dirigiéndonos a las viviendas de personas de avanzada edad que recordarían claramente estos fenómenos.



Sr. Antonio Sánchez

Sr. Antonio Sánchez

El Sr. Sánchez de 87 años, vive en una casa a la margen izquierda del Chanchán aguas arriba del puente, relato acerca de dos crecientes que él recuerda como catastróficas para el pueblo; la del año 1953, que provocó la inundación del pueblo, este evento se produjo cuando el cauce del río se encontraba aproximadamente a nivel de un montón de tierra que se encontraba cerca del puente, si consideramos el nivel presente, el cauce del río para ese entonces se ubicaría a más de 5m por encima del cauce actual”.

La crecida del 82, que provoca la destrucción en la margen derecha al frente de su vivienda... existía un muro antiguo (más pequeño que el actual) que fue destrozado y para ese entonces ya el cauce se había profundizado aproximadamente unos 2.5m a partir de la década de los 50.

Sr. Reinaldo Paredes

El Sr. Paredes de 74 años recuerda algunas crecientes ocurridas, no con mayor detalle pero destaca la importancia que tuvieron los eventos para la población, su vivienda ubicada en la margen derecha del Chanchán aguas arriba del puente.

Los eventos del 1944, 1950 y 1953, recuerda como crecientes que causó desesperación en el pueblo, más aún la del 50 que provocó destrozos en algunas viviendas e inundación considerable del pueblo.



Sr. Reinaldo Paredes

La del año 1982 manifiesta que es la máxima crecida que ha presenciado en su vida, cuenta que fueron 3 días consecutivos del evento acompañado de lluvias torrenciales que provocó el pánico de la población. Además contó que en el puente principal el nivel del agua para ese evento había alcanzado el borde superior del muro construido en la margen izquierda y sobrepasado un muro antiguo de la margen derecha, el agua producto del oleaje chocaba con la plataforma del puente. De esta declaración se puede levantar el nivel considerado para la crecida del 82 en el puente.

Una sección del muro construido en la margen derecha es levantado por la crecida y depositado aguas abajo en



la margen derecha, también manifiesta con preocupación la socavación del cauce del río desde los años 50 en aproximadamente 5m.

Srta. Fanny Zuñiga

La Srta. Zuñiga de 58 años, tiene una tienda de abarrotes 100 m aguas abajo del puente principal, recuerda claramente la inundación del pueblo en el año 50, época en la que tuvieron que desalojar las viviendas y Huigra quedó muy afectada, menciona que la crecida del 82 fue muy destructiva y aunque no recuerda haber visto el río, el ruido producido fue ensordecedor y creía que el pueblo iba

a ser destruido. “El mayor deseo de los habitantes es que se pueda reconstruir los muros de protección a las orillas del río, porque Huigra empieza a agonizar a causa de la falta del tren y el efecto del amenazante río Chanchán”.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para efectos de lograr la reconstrucción de una crecida histórica en el río Chanchán se optó por utilizar dos herramientas: una informática, el sistema de modelización hidrodinámica MIKE 11 y una aproximación matemática tradicional, la fórmula de Manning.

Estimación usando modelización hidrodinámica en MIKE 11

El sistema de modelización hidrodinámica MIKE11 es un sistema dinámico para la modelización unidimensional de flujo rápidamente variado, analizando regímenes sub y supercrítico, por lo que brinda la flexibilidad necesaria para modelar las condiciones presentes en un evento de crecida histórica en el río Chanchán.

El modelo simplificado de un tramo del río Chanchán a su paso por la población de Huigra se construye a partir del levantamiento de 15 secciones transversales del río separadas 40m aproximadamente y la pendiente del mismo. La rugosidad utilizada para todo el tramo del río es $n = 0.065$ (USGS, 2006), elegida de acuerdo al documento. Una vez creado el modelo se lo alimentó con un hidrograma de crecida de hasta 400 m³/s, posteriormente se verifica en las secciones ingresadas los niveles proporcionados en los testimonios de los pobladores de Huigra, para obtener los caudales de las curvas de descarga de las secciones correspondientes.



Figura 2. Curva de descarga en el Río Chanchán y lectura del valor de caudal para la altura correspondiente.

Curva de Descarga para una sección del río Chanchán

La reproducción del modelo arroja como resultado un caudal de 235 m³/s que se obtiene de la curva de descarga. Figura. 2.

Se presenta en las Figura. 3 y Figura. 4 el perfil longitudinal del río junto con el caudal correspondiente a la crecida máxima, y las secciones transversales en algunos puntos del río junto con el caudal de crecida máxima.

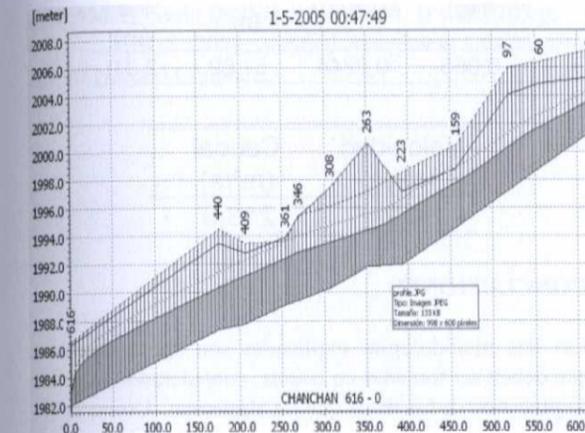


Figura. 3. Perfil Longitudinal del río Chanchan a la crecida máxima.

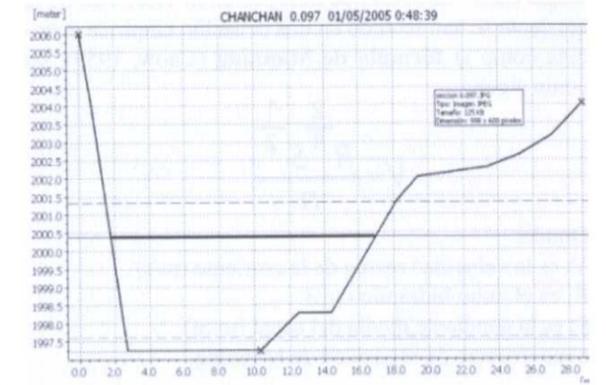
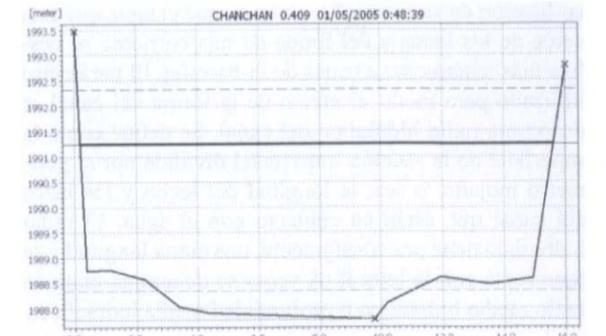
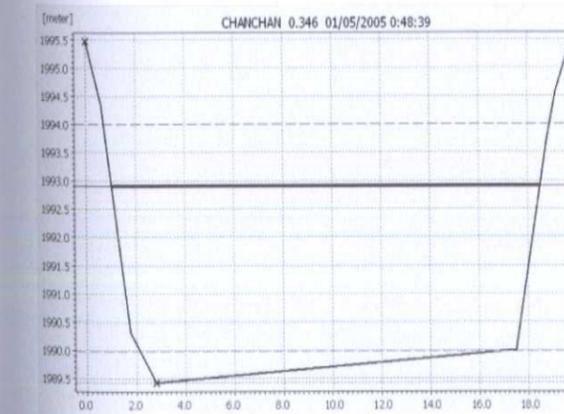


Figura 4. Secciones Transversales del río Chanchán.

Estimación mediante Manning

La medición del caudal de las corrientes naturales generalmente no es exacta debido a que el cauce suele ser irregular, por lo tanto es irregular la relación entre nivel y caudal. Los canales de corrientes naturales están también sometidos a cambios debidos a erosión o depósitos. Por esta razón es preciso realizar un análisis empírico para la obtención del caudal máximo sucedido hace más de dos décadas, la falta de información conlleva a no tener una precisión absoluta al momento de estimar el mismo.

La metodología a seguir para el efecto es la utilización de la formula de Manning, cuyo objetivo principal es determinar la velocidad de la corriente, que viene determinada por varios factores:

La gradiente o la pendiente. Si todos los demás factores son iguales, la velocidad de la corriente aumenta cuando la pendiente es más pronunciada.

La rugosidad. El contacto entre el agua y los márgenes de la corriente causan una resistencia (fricción) que depende de la suavidad o rugosidad del canal. En las corrientes naturales la cantidad de vegetación influye en la rugosidad al igual que cualquier irregularidad que cause turbulencias.

Forma de la sección. Los cauces naturales tienen diferentes secciones transversales, pendientes y rugosidad, además existen diferencias de velocidad de la corriente

en función de su forma. La razón es que el agua que está cerca de los lados y del fondo de una corriente se desliza más lentamente a causa de la fricción. El parámetro utilizado para medir el efecto de la forma del canal se denomina radio hidráulico del canal. Se define como la superficie de la sección transversal dividida por el perímetro mojado, o sea, la longitud del lecho y los lados del canal que están en contacto con el agua. El radio hidráulico tiene por consiguiente, una cierta longitud y se representa con la letra R. A veces se denomina también radio medio hidráulico o profundidad media hidráulica.

Todas estas variables que influyen en la velocidad de la corriente se han reunido en una ecuación empírica conocida como la **fórmula de Manning** (Chow, 1959), tal como sigue:

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

Donde:

V: es la velocidad media de la corriente (m/s)

R: es el radio hidráulico (m)

S: es la pendiente media del canal (m/m)

n: coeficiente de rugosidad de Manning.

En sentido estricto, la gradiente de la superficie del agua debe utilizarse en la fórmula de Manning; es posible que no sea el mismo gradiente del lecho de la corriente cuando el agua está subiendo o bajando. Sin embargo, no es fácil medir el nivel de la superficie con precisión por lo que se suele calcular una media de la gradiente del canal a partir de la diferencia de elevación entre varios conjuntos de puntos situados a 100 metros de distancia entre ellos.

Por este motivo se levantan 15 secciones a lo largo de un tramo del río de 600m para evaluar eficientemente estos parámetros. Realizado el análisis, se determina en base a la experiencia y a la literatura correspondiente, que el valor adecuado de n de Manning es de 0.065. Los resultados de este modelo se indican en la tabla 1

Tabla 1. Resultados de la modelación empírica

Rugosidad (n)	Pendiente (m/m)	Área Sección (m ²)	Radio Hidráulico (m)
0,065	0,0244	51,69	2,31
		Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)
		4,2	216,9

CONCLUSIONES

Las dos metodologías explicadas son aproximaciones que deben ser tomadas en cuenta, considerando el grado de precisión de los datos que las alimentan. Como se explica en la investigación, la información proporcionada por los pobladores de Huigra está sujeta a una visión subjetiva de un evento ocurrido hace varios años.

Sin embargo, la aproximación matemática obtenida mediante la aplicación de las dos metodologías, arroja resultados similares, lo que permite inferir que el caudal máximo presentado en las últimas décadas en el río Chanchán sobrepasó los 200m³/s.

BIBLIOGRAFIA

- CAF: EL FENOMENO EL NIÑO 1997 – 1998 MEMORIA, RETOS Y SOLUCIONES. Volumen V. Corporación Andina de Fomento
- Chow, V. T. 1959. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill, Inc.
- INAMHI. Fenómeno El Niño 1997-98. Evaluación meteorológica. Informe final. 1998.
- Rossel F. 1997. Influencia de El Niño sobre los regímenes hidro-pluviométricos del Ecuador. ORSTOM – INAMHI, Serie INSEQ, 18, Tomo I, II y III, 203 p.
- USGS. 2006. Verified Roughness Characteristics of Natural Channels



Caracterización de los Deslizamientos de Tierra de Gran Magnitud en la Cuenca del Río Chanchán

J.P. Sánchez, F. Cisneros, J. Bojorque,
H. Ayón.

Programa para el Manejo del Agua y del Suelo,
PROMAS, Universidad de Cuenca,
Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador.
E-Mail: promas@ucuenca.edu.ec



Resumen

El propósito de esta investigación es caracterizar los grandes movimientos de masas producidos en la cuenca del río Chanchán; dentro de un marco conceptual que permita evaluar los factores de riesgo que desencadenan los deslizamientos de carácter: geológicos, geomorfológicos, antrópicos y meteorológicos, y a su vez, identificar áreas potencialmente críticas que a futuro requieran implementar investigaciones geotécnicas y/o de monitoreo. Para éste propósito se aplicó la regresión logística y el análisis de precipitaciones extremas. Los movimientos de laderas dentro de la cuenca han causado el represamiento del río Chanchán, la destrucción de tramos de la vía ferroviaria, la destrucción de tramos de carreteras incluyendo la vía Panamericana, y, han causado pérdida de vidas humanas y viviendas en los pueblos de la región, lo cual por tratarse de un fenómeno natural que amenaza la vida de personas y la propiedad, justifica éste estudio.

Palabras Clave: Movimiento de Masas, Precipitaciones extremas, Curvas IDF, Cuenca del río Chanchán.



1. Introducción

Los movimientos de masas de suelo causan catastróficos daños a la propiedad y pérdidas de vidas humanas, [1] de éstas un 95%, están relacionados con los deslizamientos. Se dan justamente en los países en vías de desarrollo [2].

Continuamente están ocurriendo deslizamientos en la cuenca del río Chanchán. El más importante y trágico suceso se dió en Marzo del 1983, produjo un flujo de lodos (flujo rápido) que se precipitó en la curva del carretero antes de llegar a la población de Chunchi, movilizó aproximadamente 1'000,000m³, dejando un saldo de 150 muertos. Otro de los eventos más importantes y que ha afectado a varias poblaciones, es el deslizamiento del cerro Chuplicay que cortó la comunicación de la vía Huigra-Guayaquil con unos 16'000.000m³ removidos, de la misma manera el deslizamiento de la Jaula, que causó en 1999 el represamiento del río Chanchán en el cantón Huigra, el mismo que afectó al kilómetro 126 de la vía férrea. A partir de ese año este tramo ha quedado suspendido, situación que ha afectado notablemente al turismo en la zona.

Debido a lo anterior, en la presente investigación, con el uso de sistemas de información geográfica (SIG), se pretende caracterizar las áreas de mayor vulnerabilidad y susceptibilidad a los deslizamientos, ya que la cuenca del río Chanchán tiene aproximadamente 1400Km², que la convierte en una cuenca grande. La caracterización de deslizamientos en la cuenca del río Chanchán, se justifica en una primera instancia a nivel regional debido a que para obtener el factor de seguridad (FS) en laderas en áreas geográficas extensas, se tendría que invertir mucho tiempo y recursos y no se obtendría una idea global de sus causas [3].

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

La cuenca del Chanchán, se encuentra ubicada sobre la cordillera de los Andes, en su mayor proporción en la región Sierra, y una menor parte en la Costa, delimitada por las coordenadas UTM: 705.029E, 764.580E y 9'730.305N, 9'777.314N (ver figura 1), tiene un área aproximada de 1400Km², localizada entre las cotas: 340 - 4320m s.n.m..

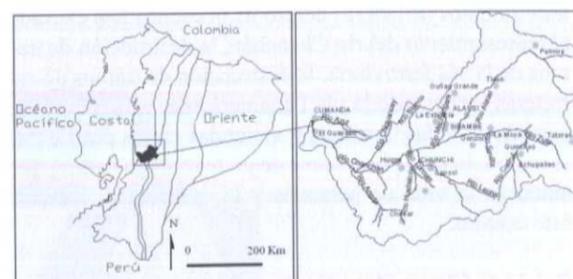


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Chanchán.

2.2. Materiales

- Proyecto "Carta Nacional": Fotografías aéreas del sitio de estudio, a escala aproximada 1:60.000, de números: 27060 a 27069 y 27331 a 27337 del rollo R-142 JET; 27704 a 27714, del rollo R-144 JET, las fotografías 20016 a 25018 y 25026 a 25028 del rollo R-133 JET. Tomadas en: 25/08/1989, 17/07/89 y 27/07/89, respectivamente cada uno de los rollos.
- PROMAS-IGM: Mapa topográfico escala 1:25.000, en formato digital.
- PROMAS: Modelo de elevación digital (DEM) con una grilla de 30m basado en la topografía del IGM.

Además se utilizaron otras fuentes de información digital y de la biblioteca del Promas Universidad de Cuenca y recursos de software como Arcview 3.2 e Idrisi Kilimanjaro. También fueron recopilados datos de precipitaciones del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología).

2.3. Métodos

En el presente estudio se levantaron relictos de las zonas de grandes deslizamientos dentro de la cuenca del río Chanchán y con manejo de sistemas de información geográfica se realizó un modelo basado en análisis estadístico. Para caracterizar y delimitar áreas susceptibles a movimientos de masas; sobre las cuales se podría realizar a futuro investigaciones geotécnicas más exhaustivas por cuanto las condiciones que permitieron fallas de taludes en el pasado, seguirán en condiciones de inestabilidad en el futuro [4].

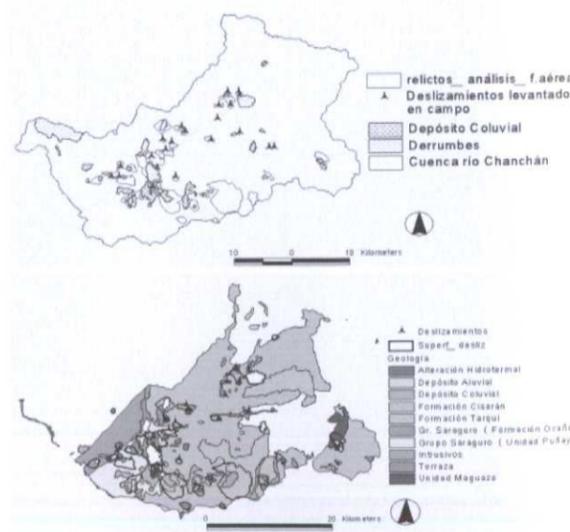


Figura 2. Zonas inestables de la cuenca del río Chanchán (arriba) y Delimitación del área de análisis (abajo).

En la figura 2 (arriba), se observan las zonas inestables que fueron identificadas mediante la interpretación de

fotografías aéreas: "relictos análisis f.aéreas". Los deslizamientos que fueron levantados en los recorridos de campo se encuentran identificados por las marcas como "Deslizamientos levantados en campo".

La figura 2 (abajo) muestra una delimitación del área de análisis dentro de la cuenca, por cuanto en estudios previos se ha demostrado que existe una mayor correlación con los deslizamientos.

$$Vulnerabilidad(iii)\% \text{ (clase)} = \frac{\text{área ocupada dentro de los deslizamientos}(i)}{\text{área ocupada dentro de la cuenca}(ii)} \times 100 \quad (1)$$

Finalmente, en relación con el tratamiento de mapas, se realizó el análisis probabilístico de la susceptibilidad a grandes deslizamientos, del área estudiada, para evaluar los factores de caracterización de grandes deslizamientos (mapas y clases dentro de cada mapa); empleando para éste análisis todos los mapas a la vez. Para el análisis se empleó la regresión logística, que emplea los estimadores de máxima probabilidad, encontrando el máximo ajuste a un conjunto de parámetros [4] [6] [7].

$$Area_Bajo_la_Curva = \sum_{i=1}^n [x_{i+1} - x_i] * [y_i + (y_{i+1} - y_i) / 2] \quad (2)$$

Una vez escogido el mejor modelo, por medio del estadístico ROC, se procede a categorizar la probabilidad de las áreas de deslizamientos en clases; éstas son validadas con los deslizamientos más importantes sucedidos dentro de la cuenca.

Se realizó un análisis probabilístico relativo espacial estimado, de la ocurrencia de un deslizamiento de gran magnitud [5], utilizando la regresión logarítmica, de las clases que intervienen en los mapas. Se realizó también un análisis de vulnerabilidad de las clases de los mapas; el criterio para evaluar la vulnerabilidad de cada clase se presenta en la ecuación (1):

El estadístico ROC, fue utilizado para evaluar el mejor modelo, éste es el área bajo la curva que conecta los puntos trazados. Idrisi usa la regla trapezoidal de cálculo integral para calcular el área, donde xi es la proporción de falsos positivos para el umbral i, el yi es la proporción de verdaderos positivos para el umbral i, y n es el número de grupo de los umbrales, se calcula con la siguiente fórmula (2):

deslizamiento y se obtienen las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia), para disponer de los períodos de retorno de las intensidades.

3. Resultados y Discusión

3.1. Análisis de susceptibilidad y vulnerabilidad

En el cuadro 1 y figura 3 se observan los resultados de los análisis empleados de las clases del mapa de geología.

i) Deslizamientos			ii) Área delimitada			iii) Vulnerabilidad	
Unidades geológicas	Área (ha)	% del área de deslizamientos	Unidades geológicas	Área (ha)	% dentro área delimitada	Unidades geológicas	%
Alteración hidrotermal	14.89	0.14	Alteración hidrotermal	322.02	0.38	Alter. Hidr.	4
Depósito Aluvial	479.30	4.62	Depósito Aluvial	2209.24	2.59	D. Aluvial	21
Depósito Coluvial	576.25	5.55	Depósito Coluvial	2341.95	2.75	D. Coluvial	24
Formación Cisarán	2332.98	22.48	Formación Cisarán	38201.74	44.79	Formación Cisarán	6
Formación Tarqui	3409.20	32.85	Formación Tarqui	23751.39	27.85	F. Tarqui	14
F. Ocaña	373.00	3.59	F. Ocaña	5790.88	6.79	F. Ocaña	6
U. Puñay	1388.80	13.38	U. Puñay	6492.38	7.61	U. Puñay	21
Intrusivos	711.31	6.85	Intrusivos	1696.00	1.99	Intrusivos	41
Terrazas	817.41	7.88	Terrazas	3093.20	3.63	Terrazas	26
Unidad Maguaso	274.54	2.65	Unidad Maguaso	1387.69	1.63	U. Maguaso	19
Superficie total	10377.67	100.00	Superficie total	85286.48	100.00		

Cuadro 1. Resultados del análisis del mapa de geología del área delimitada.

Las unidades geológicas de mayor vulnerabilidad en orden de importancia son: Intrusivos, Terrazas, D. Coluvial, D. Aluvial, Unidad Maguaso, Formación Tarqui.

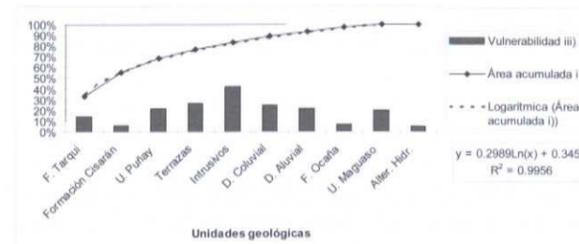


Figura 3. Vulnerabilidad y susceptibilidad geología

El resultado del análisis de regresión de las áreas acumuladas, observado en la Fig. 3; sin embargo confirma,

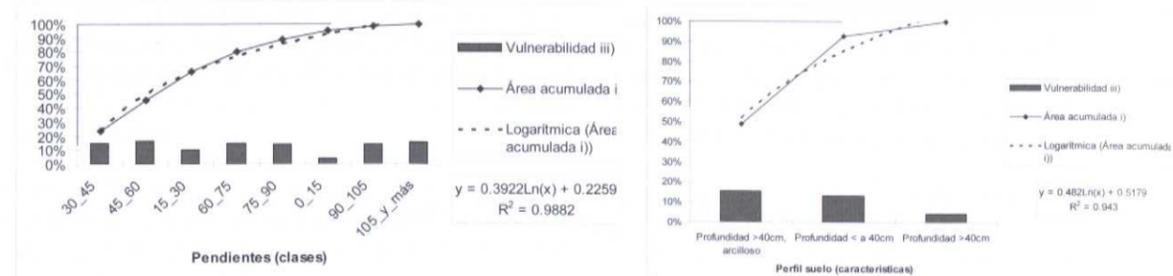


Figura 4. Vulnerabilidad y susceptibilidad Pendientes (Izquierda); y Vulnerabilidad y susceptibilidad Perfil S (Derecha),

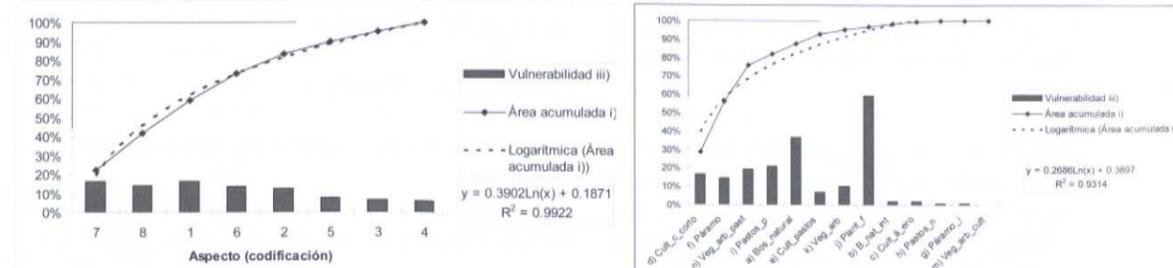


Figura 5. Vulnerabilidad y susceptibilidad Aspecto (izquierda); y Vulnerabilidad y susceptibilidad Uso Suelo (Derecha).

3.2. Elaboración del mapa de susceptibilidad del área de estudio de la cuenca del río chanchán

Se emplea el análisis de regresión logística para elaborar el mapa de susceptibilidad, dentro del área de estudio de la cuenca del río Chanchán, que considera a todos los mapas y clases de los mapas a la vez.

que si fuera posible considerar todos los aspectos que engloba la vulnerabilidad a deslizamientos (no solo a la geología), la probabilidad relativa espacial estimada de la ocurrencia de un deslizamiento de gran magnitud [5], sería del 0.3452 de susceptibilidad que se presente en el área de la Formación Tarqui y de 0.8263 de susceptibilidad de que se presente entre las áreas comprendidas por las unidades geológicas (probabilidad acumulada, debido a que se han acumulado las áreas): Formación Tarqui, Formación Cisarán, Unidad Puñay, Terrazas e Intrusivos; siendo la función logarítmica de probabilidad; $y = 0.2989\ln(x) + 0.3452$, con $R^2 = 0.9956$.

De manera general, para el análisis de los mapas sucesivos se emplea la misma metodología, los resultados en la figura 4 y 5.

MODELO PRINCIPAL	ROC
Full Model	0.7539
MODELOS ALTERNATIVOS	
Modelo corrido sin el mapa de aspecto	0.6561
Modelo corrido sin el mapa de pendientes	0.6700
Modelo corrido sin el mapa de uso del suelo	0.6710
Modelo corrido sin el mapa de perfil de suelo	0.6732
Modelo corrido sin el mapa de aeoloia	0.6912

Cuadro 2. Comparación de los diferentes modelos de acuerdo al estadístico ROC.

$$L = -5.1916 + 1.090076 \times G + 0.794333 \times P + 0.619864 \times A + 0.881160 \times PS + 1.043093 \times US \quad (3)$$

Siendo L la longitud del deslizamiento; G la geología; P las pendientes; A el aspecto; PS el perfil del suelo y US el uso del suelo

Susceptibilidad (rangos)	Área (ha)	Área de estudio (ha)	% del Área de estudio
0.1217-0.15	11884.14	111483.13	10.660
0.15-0.25	14415.12	111483.13	12.930
0.25-0.35	12298.14	111483.13	11.031
0.35-0.39	666.18	111483.13	0.597
0.1217-0.39	39263.58	111483.13	35.219

Cuadro 3. Análisis de los resultados de la regresión logística.

3.3. Análisis de susceptibilidad en el área de estudio de la cuenca del río chanchán

Para realizar un análisis de susceptibilidad de deslizamientos dentro del área de estudio se presenta la Figura 6.

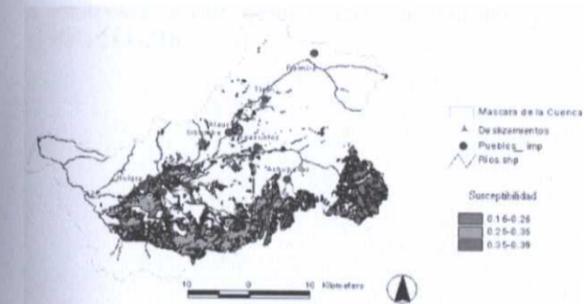


Figura 6 Alta susceptibilidad de deslizamientos

En la figura 6, se observa que las áreas que más riesgo presentan a los deslizamientos son las vecinas a Huigra, ubicadas al sur del río Chanchán, donde se encuentran elevaciones como el cerro Puñay. Las áreas menos propensas a deslizamientos son las ubicadas al Norte del río Chanchán. En general las áreas vecinas al pueblo de Piñancay también presentan alto riesgo. Cabe anotar que el pueblo de Piñancay (entre Huigra y Chunchi) se observa en blanco en la figura, debido a estar ubicado en un área que no presenta buena correlación con los deslizamientos a pesar de que es un área de derrumbes, por lo tanto no fue considerada dentro del análisis, a lo largo de la presente investigación (ver figura 2).

3.4. Construcción de escenarios probabilísticos de disparo de deslizamientos debido a precipitaciones

Diferentes escenarios han sido modelados para los períodos de retorno de las precipitaciones acumuladas entre 1 a 40 días; con los datos de las estaciones Chunchi y Achupallas, con las que se obtuvieron la curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia). En el caso de la estación Chunchi y Achupallas se utilizan los datos diarios del período comprendido entre los años 1982-2004.

Cuadro 4 Precipitaciones acumuladas de 1 a 25 días y periodos de retorno para los eventos de deslizamientos en la cuenca del río Chanchán

	1 día	3 días	5 días	10 días	15 días	20 días	25 días
Chunchi 31/03/1983	Sictur-río Huataxi (flujo de lodos, 150 muertos)						
Precipitación acumulada	27	71.6	81.4	113.1	123.8	149.5	
Intensidad (mm/día)	27	23.87	16.28	11.31	8.25	7.48	
Periodo de retorno (años)	4.4	46	30	19	11	14	
Chunchi 28/04/1983	Se fue la carretera Panamericana a la altura de Gonzol						
Precipitación acumulada	402	411.3	622.3	646.6	677.6	713	
Intensidad (mm/día)	402	137.1	124.46	64.66	45.17	35.65	
Periodo de retorno (años)	>1000		>1000				
Achupallas 19/11/1997	San Antonio (pérdida de vidas humanas)						
Precipitación acumulada	9.5	48.8	68.5	138.1	163.2	189.7	
Intensidad (mm/día)		16.27	13.7	13.81	10.88	9.49	
Periodo de retorno (años)		2.5	3.3	14	12	4.5	
Achupallas 17/03/2005	San Antonio - Paccha Baqtinas (31 viviendas destruidas)						
Precipitación acumulada	18.5	45	77.4	123.5	174.8	214.9	2
Intensidad (mm/día)	18.5	15.00	15.48	12.35	11.65	10.75	10
Periodo de retorno (años)	1.3	2.1	4.9	7	18	7	1

Cuadro 4. Precipitaciones acumuladas de 1 a 25 días y periodos de retorno para los eventos de deslizamientos en la cuenca del río Chanchán.

4. Conclusiones

Los deslizamientos son un grave problema dentro de la cuenca del río Chanchán. Así mismo los eventos de deslizamientos están muy bien correlacionados con las clases consideradas en la regresión logística, en los mapas de susceptibilidad de deslizamientos. En ello se concluye debido a que los deslizamientos levantados en campo son considerados con el criterio de ser los más relevantes ocurridos en la cuenca, en que los más recientes no necesariamente coinciden con las zonas de los relictos de los deslizamientos levantados de las fotografías aéreas.

La caracterización de los factores vulnerables a grandes deslizamientos son:

- Mapa de Geología: Intrusivos, Terrazas, Depósitos Coluviales, Depósitos Aluviales, Unidad Puñay, Formación Tarqui
- Mapa de Pendientes: Pendientes superiores al 30%

- Mapa del Perfil del Suelo: Suelos profundos (>40cm) con alto contenido de arcilla y suelos poco profundos (<40cm)
- Mapa de Aspecto (las siguientes direcciones de la pendiente): Norte, Nor-Este, Sur-Oeste, Oeste y Nor-oeste
- Mapa de Uso Actual de Suelo: Plantaciones forestales, bosque natural, pastos plantados, vegetación arbustiva con pastos y páramos.

Considerar períodos de retorno de precipitaciones que disparan deslizamientos, acumulados mayores a 25 días, resultaría irrelevante, inclusive en años húmedos; así lo demuestra el análisis presentado en el cuadro 4, aunque en estudios previos con menos años de datos, inciden las lluvias de hasta 40 días, pero los períodos de retorno de las lluvias no fueron relevantes; no así en la presente investigación.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Chung, C.F., Fabbri A.G., y van Westen C.J. 1995. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. Pp 107-133. En: Zaitchik B.F., y van Es. H.M., 2003. Applying a GIS slope-stability model to site-specific landslide prevention in Honduras. *Journal of soil and water conservation* JF VOLUME 58 NUMBER 1; PAG.45-53
- [2] Hansen, A. 1984. Landslide Hazard Analysis. Pp 523-602. En: Zaitchik B.F., y van Es. H.M., 2003. Applying a GIS slope-stability model to site-specific landslide prevention in Honduras. en: *Journal of soil and water conservation* JF VOLUME 58 NUMBER 1; PAG.45-53
- [3] Morgenstem, N.R., 1997. Toward landslide risk assessment in practice. *Proceedings of the International Workshop on landslide risk assessment*. Honolulu, Hawaii, USA, pp. 15-23.
- [4] Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31 (1999) 181-216.
- [5] Zêzere, J.L., Reis E., García R., Oliveira S., Rodríguez M.L., Viera G, y Ferreira A.B., 2004. Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4: 133-146.
- [5] Atkinson P., Jiskoot H., Massari R., y Murria T., 1998. Generalized Linear Modeling. *Geomorphology. Earth Surf. Process. Landforms*, 23, 1185-1195
- [5] Ayalew L., y Yamagishi H., 2003. The application of GIS-based logistic regression for landslides susceptibility in the Kakuda-Yahiro Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65 (2005) 15-31.
- [5] Claessens L., Lowe D.J., Hayward B.W., Schaap B.F., Schoorl J.M., y Veldkamp A., 2005. Reconstructing high-magnitude/low-frequency landslide events based on soil redistribution modelling and a Late-Holocene sediment record from New Zealand. *Geomorphology* xx (2005) xxx-xxx. Article in press. En: www.sciencedirect.com
- [5] Giannecchini R., 2005. Rainfall triggering soil slips in the southern Apuan Alps (Tuscany, Italy). *Advances in Geosciences* (2005) 2: 21-24.



**Analysis of the Impact
of the Scale and Quality
of Catchment Information
on The Predictability of the Swat
Semi-Distributed
Hydrological Model**

P. Crespo (1), F. Cisneros(1), P. Torres(1), J. Feyen (2)

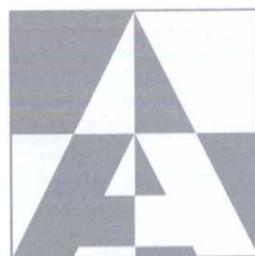
(1) Programa para el Manejo del Agua y del Suelo,
PROMAS, Universidad de Cuenca,
Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador.
E-Mail: promas@ucuenca.edu.ec

(2) Department of Land Management and Economics,
Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Belgium
pcrespos@yahoo.com

Key words: micro-catchment, hydrologic modeling, hydrological data

Abstract

Assessment of the type and detail level of catchment information effect on the performance of the semi-distributed SWAT hydrological model was the main objective of the research. The Lise micro-catchment (2.34 km²), a mountainous subbasin in the Chanchan river basin, was used. The information to run SWAT consisted of: (1) local data derived from in-situ and laboratory measurements; and (2) regional data derived from country maps and databases. The analysis revealed that the spatial distribution of rainfall is the most sensitive model input, although simulations with the SWAT model showed that for the study micro-catchment with one rain gauge, given that the rain gauge is properly located, similar results could be obtained than using the areal rainfall data derived from a network of 6 rain gauges. The research also revealed that it is not possible to adequately simulate the hydrology of the micro-catchment using regional information.



1. INTRODUCTION

A good understanding of the hydrological processes is essential for the treatment of the hydrological resources; the precipitation-runoff process is very complex given the high grade of spatial variety of the precipitation, which is often attributed to the interaction between the ecosystems and their characteristics such as: precipitation, vegetation, land use, topography, etc. The mathematic models are important tools used for a better understanding of these processes; Those was developed for management practices, risk and profits evaluation during large periods [1]. The main problem in hydrology is obtain and transfer the information to analyse hydrologic solution from one place to another [2].

To implement a model, two considerations must be taken into account: (1) the selection of a model which is compatible with the application, since the model structures are different [3, 4] and (2) the selection of the scale and appropriate parameter values for the model in accordance to the characteristics of the study area [5].

As a consequence, one aspect of crucial importance in the implementation of models is to define the scale in which the application will be realized. This considerations must be consistent for all data inputs; if for instance the implementation is realized in the 1:25,000 topographical scale, the soil map, the climate information as well as the precipitation, etc must have this resolution. Unfortunately, the information in Ecuador in general has different scales depending on the regions in which the work has been done. For this reason, this study will be carried out at two levels: one at regional scale and the other at research scale (micro-catchment).

For the regional scale, the information with the best resolution that was available for the study area is used (surface area > 1000 km²); whereas for the research scale the detailed information, obtained by fieldwork and research, which is available at PROMAS (University of Cuenca) is used. Moreover this research scale is used as the scale for the micro-catchments (surface area < 1000 km²) [6].

Global studies show that hydrological models are scale-sensitive to soil as well as vegetation information [2, 7, 8, 9, 10] and precipitation [11, 12, 13]. Chaplot [14] studied the effect of the scale of the soil map on the SWAT model results in a basin of 21.8 km² in Iowa. The results show that more accuracy was obtained with an input scale of 1/25,000 then with 1/250,000 and 1/500,000.

The results of the compiled studies show that identifying an appropriate scale is crucial for the prediction of the run-off. In Ecuador, as mentioned before, there are no existing studies that lead to this understanding. The different parameters of the model easily influence the results of the model have a strong influence on the results of the model; But there is no way that we could pass over the scale of the input maps, either the spatial distribution of the basin characteristics.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Location and description of the study area

The study area is situated in the central south of Ecuador, in the Province of Chimborazo, part of the Chanchán River basin. One of its tributaries at the left bank with an area of 2.34 km² is the Lise River, corresponding to a

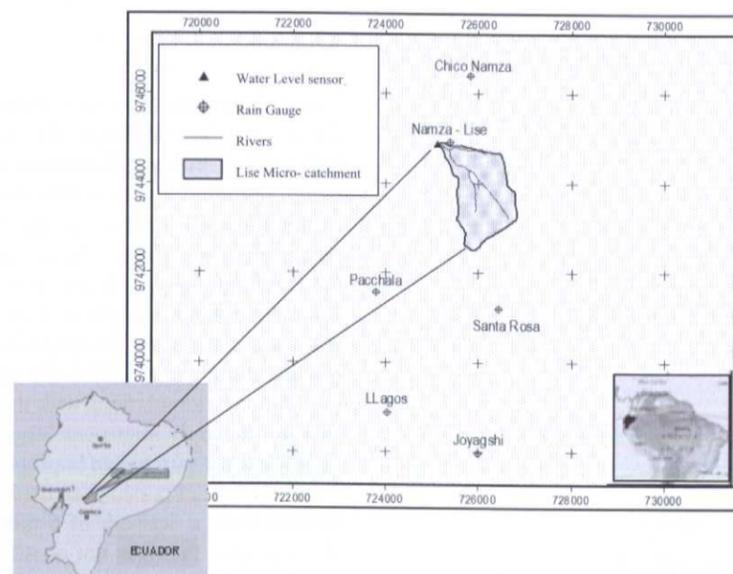


Figure 1. Location of the Lise micro-catchment and gauge sensors

micro-catchment scale. The micro-catchment of the Lise River is located between the UTM coordinates - 9744957 N - 9742480 N, 726823 - 725099 O (Figure 1)

The climate has two marked seasons: raining period (December - May) and dry period (June - November). The soil is rich of organic material originating from extrusive formations (Puñay formation) with a high water retention enabling an almost constant discharge during the long dry period. The vegetation predominately consists of dense bush although the vegetation cover disappears almost completely during summertime. The catchments topography is mainly characterised by steep slopes.

2.2. Model Description

The Soil and Water Assessment Tool "SWAT" is a physical based deterministic semi-distributed model. This "grey box" type of model is intergraded in Arc View - GIS as an extension. It was developed by Dr. Jeff Arnold for the USDA Agricultural Research Service (ARS) in the 90's combining two models: EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) [15] and GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems)

[16]. The current model includes a new structure for the routing phase, flexibility in the basin configuration, irrigation, lateral stream and a component for groundwater [17]. Although it is developed to predict the impacts of water management, sediments and agricultural chemistry on large and complex hydrological basins with spatial variation in soil, land use and management conditions over large periods [18], moreover it uses concepts for small basins as it is the case of the curve number method.

2.3. General input data

The variability in SWAT is considered using sub modules as there are: groundwater, basin, subbasins, HRUs, main river channel, soils, management and others. The results of the SWAT model are affected by (1) the preparation of the input information and (2) the internal aggregation of the model.

The model has been implemented with information during the period from 05/03/2005 to 22/09/2005. The input information has been prepared in two sets of data with a different resolution (Table 1). For the Digital Elevation Model (DEM) generation topography 1:25,000

Table 1 set of considered data

Set Datos	Regional Scale	Research Scale
DEM	Grid 50 m	Grid 25 m
Soils	ORSTOM 1: 50,000 2 soil types	PROMAS 1: 10,000 3 soil types aggregated
Uso Suelo	IGM, SIG-AGRO-CLIRSEN 1: 250,000 2 classes	PROMAS Image Landsat 30 m resolution 2 classes aggregated
Clima	Web INAMHI Ecuador 1 Pluviograph at 6 Km distance 1 meteorologic station at 50 Km distance	Web PROMAS U. Cuenca 6 Pluviograph 1 meteorologic station

has been used and a cell resolution of 25m (research) and 50m (regional) has been chosen. Errors due to cell resolution were visually checked during the data preparation prior to the modelling.

1 Meteorologic station

Soil information has been collected at regional scale (1:50,000 - realized by ORSTOM), while additional soil parameters were collected from literature, based on the predominant texture. Information at research scale was obtained by the description of soil profiles in transects, for which field and laboratory experiments were performed in order to obtain the necessary parameters. A detailed description of the results can be found in Crespo [11]. Soils were classified using the World Reference Base for Soil Resources (WRB).

At regional scale, land use information has been collected at an existing scale of 1:250,000, realized by an agreement between IGM, SIG-AGRO and CLIRSEN,

while at research scale a LANDSAT image in combination with field data was used.

Concerning the precipitation, the pluviograph of Joyagshi at 60km of the study area has been used, while at research level 6 pluviographs are used; a meteorological station at 50 km of the study area and a local meteorological station (installed in the micro catchment itself) provided climatologic information at regional and research scale respectively (see figure 1).

In this study, a minimum value of 7 ha (CSTV - 'Catchment Size Treshhold Value') was used to delineate the rivers and a combination of 10% to create the HRUs in each subcatchment. The rainfall-runoff process was modelled using de curve number method. The climate event generator of SWAT was used to calculate the parameters for the evapotranspiration during the lacking period. The calculation was done using the Penman-Monteith method.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Prior to the calibration of the model, a sensitivity analysis was carried out. The parameters considered as sensitive are: average length of the lateral slope (SLSUBBSN), travel time of the lateral flow (LAT_TIME), length of the main channel (CH_L2), depth of the soil horizon (SOL_Z) and initial water storage in the soil (FFCB). However, when considering the interaction, other important parameters exist: groundwater delay time (GW_DELAY), capacity of water available in the soil horizon (SOL_AWC), saturated hydraulic conductivity (SOL_K) and curves number (CN2). The parameters mentioned above form the calibration set. A detailed description can

be found in Crespo [11].

Two calibrations were carried out to analyze the assumed objectives for (1) the research information and (2) the regional information. For both calibrations only the parameters of the calibration set were considered.

At research scale, the calibration gave an efficiency of 0.76, at regional scale -0.18; the base flow was simulated almost perfectly at research scale with EF = 0.99 and 0.78 at regional scale (tables 2 and 3); at first sight, the validation at research scale does not look very adequate. However, this can be attributed to the fact that the registered discharge does not reflect the registered precipita-

Table 2. Statistic parameters and outflow variation at research scale (R², correlation coefficient; RMSE, Root Mean Square Error; EF, Nash-Sutcliff efficiency; ΔV, volume difference simulated/observed in percentage).

Sub Flows	CALIBRATION				VALIDATION			
	R ²	RMSE	EF	Vol (%)	R ²	RMSE	EF	Vol (%)
Total Flow	0.78	0.008	0.757	6.2	0,30	0,027	-0,40	83,6
Base Flow	0.99	0.148	0.96	2.2	0,90	4,815	-27,20	84,7
Quick Flow	0.78	7.688	0.758	10.1	0,40	23,963	0,10	60,4

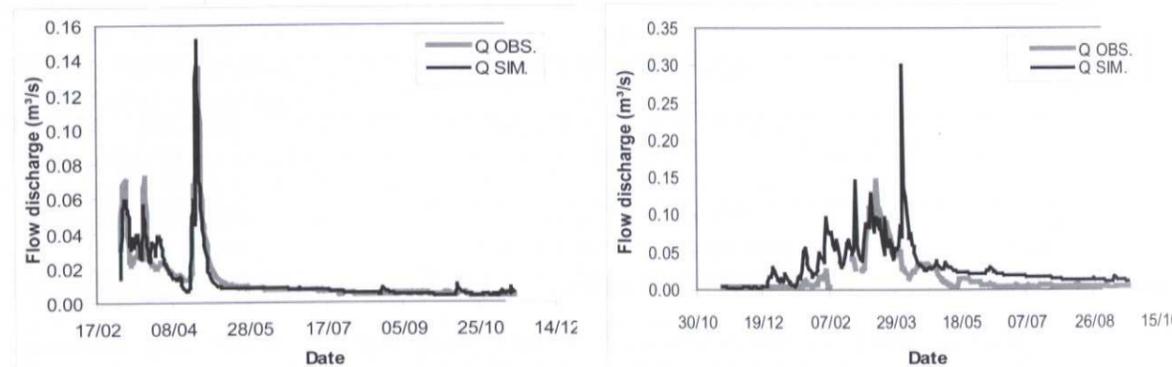


Figure 2. Comparison between observed and simulated data vs the considered time; the graph at the left shows the calibration results and the graph at the right the validation results, both at research scale.

tion due to problems with the collection of the data during this period. The rest of the simulation is acceptable (figure 2). It is important to emphasize that the model simulated the peak recession of the base flow as well as the base flow itself with great accuracy.

The analysis of the calibration results at regional scale shows problems during the whole simulation period due to existing differences in precipitation (figure 3); The pluviograph of Joyagshi (regional) is influenced by the orographic rains from the coast (by being at clouds

Table 3. Statistical parameters and outflow variation at regional scale

Sub Flows	CALIBRATION				VALIDATION			
	R ²	RMSE	EF	Vol (%)	R ²	RMSE	EF	Vol (%)
Total Flow	0.18	0.018	-0.18	29.20	0,10	55,17	-4,62	174,53
Base Flow	0.78	1.276	-1.97	18.97	0,90	5,365	-34,04	101,28
Quick Flow	0.19	15.519	-1.71	104.55	0,13	51,47	-3,29	127,43

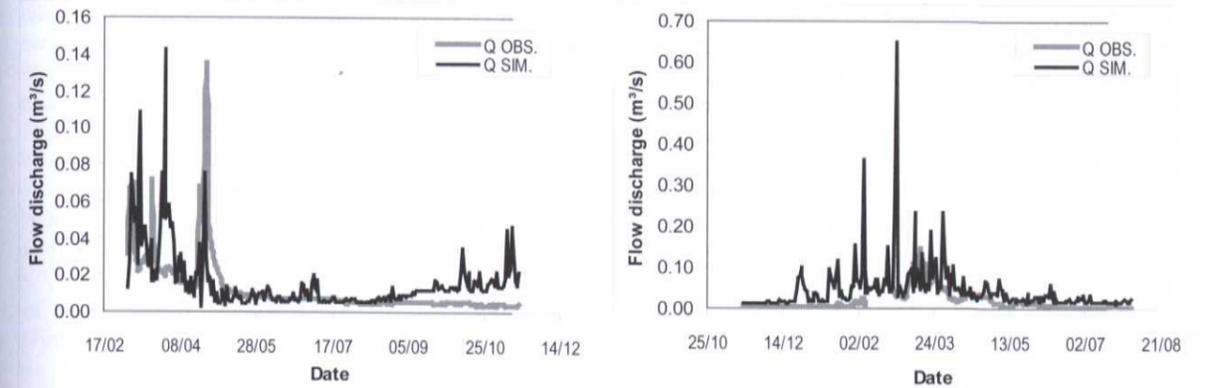


Figure 3. Comparison between observed and simulated data vs the considered time; the graph at the left shows the calibration results and the graph at the right the validation results, both at regional scale.

height) and from the west rain from the Amazonian area (rain forest) (because of its vicinity). Therefore the pluviograph registers greater precipitation which is not representative for the study area. There is a big difference in volume, up to 29% (table 3).

The scale effect has been analysed from two points of view: (1) the behaviour of the model; the objective is to analyse the effect of the spatial rain variability on the results of the model, for which the calibration was realized with research information and for which only the input pluviographs were changed to enable an individual evaluation; (2) the parameters of the model; to analyse the effect of calibrating a model with the different existing information scales.

The variation of the statistic parameter values used to analyse the behaviour of the mode is showed in figure 4l. The EF values show that the precipitation has a great influence on the results of the model. The simulations carried out with the nearest pluviographs (Lise and Chico Namza), show acceptable EF values. This means that the simulated discharge is very resembling to the observations. The same happens with the difference in run-off volume. With only one pluviograph, acceptable results were obtained. In the future it is important to analyze the location of the pluviographs since this seems to be important to reduce the amount of instruments and in addition, due to great orographic influence and the vicinity of the west area (Amazonian rainy) it has a big influence on variability of rain. The pluviograph of Joyag-

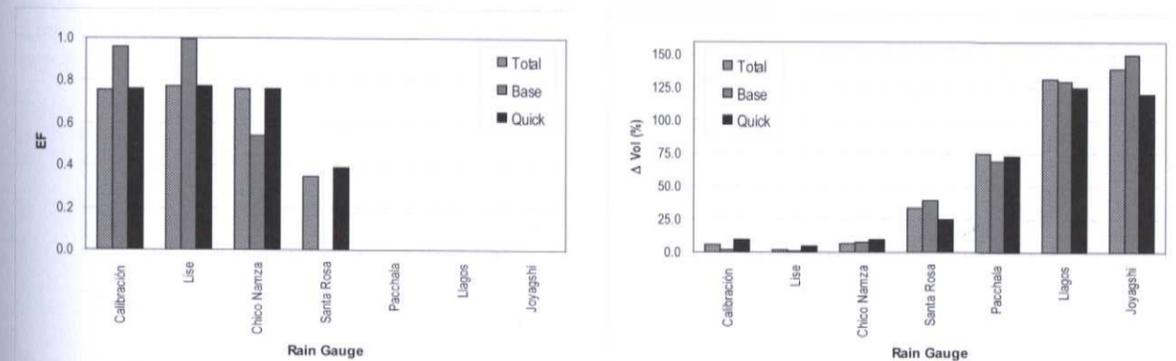


Figure 4. Variation of the statistic parameters in regard to the analyzed pluviographs

shi (regional) shows this effect since, at 6 km distance, the precipitation is completely different from the measurements done in the study area. This proves the error made when using regional information for the simulation of the discharge.

4. CONCLUSIONS

The general conclusion is that the model results are depending on the information scale, input data quality, model structure and calibration.

The parameters resulting from the calibration seem to be very scale dependent, however this does not mean that a precise scale has values that represent reality. This problem needs a profound analysis. Nevertheless, values at research scale are more appropriate for the study area.

The obtained results for the modelling at research scale were of good quality, the opposite is true for modelling at regional scale where the results are of bad quality.

An important observation is that precipitation is the most

important variable since a bad estimation of this 'parameter' does not allow retrieving appropriate values for the parameters. This application in particular was insensitive to the soil scale and cover since they don't influence the results due to internal aggregation. Yet, for basins with a considerable variability these can be of high influence.

With the available information in Ecuador it is not possible to realize simulations at micro basin scale and these simulations should not be used as a basis for basin management plans of at this scale since the obtained results would have errors similar to the errors in the research.

REFERENCES

- [1] J.C. Refsgaard, B. Storm. Construction and validation of hydrological models, En: Distributed Hydrological Modelling, Science and Technology Library, 47-54, 1996.
- [2] R. Woods. The impact of spatial scale on spatial variability in hydrologic response: Experiments and ideas, Hydrol. Sci. J. 287, 153-167, 2004.
- [3] T. Wagener, N. McIntyre. Identification of rainfall-runoff models for operational applications, Hydrol. Sci. J. 50(5), 735-751, 2005.
- [4] J. C. Ndiritu, T. Daniell. An Improved Genetic Algorithm for Rainfall-Runoff Model Calibration and Function Optimization, Mathematical and Computer Modelling. 33, 696-706, 2001.
- [5] S. Sorooshian, V. Gupta. Model Calibration, In: Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications. 23-68, 1995
- [6] P. Quinn, C. Hewett, A. Doyle. Scale appropriate modelling: from mechanisms to management. 287, 17-36, 2004
- [7] A. Romanowicz, M. Vanclouster, M. Rounsevell, I. La Junesse. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium, Ecological Modelling. 187, 27-39, 2005.
- [8] P. Laszlo, P. Laszlo, J. Szabo. Sensitivity of the SWAT Model to Spatial Variability of Land use and soil Data: A Lake Balaton Catchment Case Study. In: 3rd International SWAT Conference, 2005.
- [9] G. Schmidt, M. Volk. Effects of Input Data resolution on SWAT Simulations - A case Study at the Ems River Basin. In: 3rd International SWAT Conference, 2005.
- [10] I. Hanneland, B. Matheussen, D. Lettenmaier. Influence of spatial resolution on simulated streamflow in a macroscale hydrologic model, Water Resour. Res. 38(7), 29(1-10), 2002.
- [11] P. Crespo. Efecto de escala de la información sobre el desempeño del modelo SWAT en una microcuenca de montaña. Tesis MSc, PROMAS - U. Cuenca, 2006.
- [12] J. Faures, D. Goodrich, D. Woolhiser, S. Sorooshian. Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling, J. Hydrol. 173, 309-326, 1995.
- [13] D. Goodrich, J. Faures, D. Woolhiser, L. Lane, S. Sorooshian. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability, J. Hydrol. (173), 283-308, 1995.
- [14] V. Chaplot. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions, J. Hydrol. xx, 1-16, 2005.
- [15] J. Williams. The EPIC model, In: Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications. 909-100, 1995.
- [16] W. Knisel, J. Williams. Hydrology components of CREAMS and GLEAMS models, In: Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications. 1069-1114, 1995.
- [17] J. Arnold, P. Allen, G. Bernhardt. A comprehensive surface groundwater flow model. J. Hydrol. 142(1/4); 47, 1993.
- [18] D. Luzio. Arc View Interface for SWAT2000 User's Guide, USDA, Agriculture Research Service, Temple, Texas, USA, 2002.



Medición y Análisis de la Variabilidad Espacial de la Precipitación en Microcuencas de Montaña

P. Torres (1), F. Cisneros (1), P. Crespo (1),
B. De Bievre (1), J. Feyen (1,2)

(1) Programa para el Manejo del Agua y del Suelo,
PROMAS, Universidad de Cuenca,
Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador.
E-Mail: promas@ucuenca.edu.ec

(2) Department of Land Management and Economics,
Katholieke Universiteit Leuven, Belgium

Palabra clave: distribución espacial de lluvia, información pluviográfica, microcuencas, ubicación de estaciones.

RESUMEN

La investigación se enfoca en el análisis de la situación pluviográfica de dos microcuencas andinas ubicadas en la región centro del Ecuador; con el propósito de determinar la importancia de contar con una buena estimación de la variabilidad espacial de lluvia. Toda vez que para microcuencas hidrográficas aun se aplica la suposición de tener una precipitación uniforme, sea que los estudios se realicen para microcuencas individuales y/o formen parte de un estudio regional.

La investigación se ha realizado en dos microcuencas del río Chanchan, provincia de Chimborazo. Se instaló un total de 7 estaciones pluviográficas automáticas. Se analizó la relación existente entre altura y precipitación media diaria y media mensual, así como su intensidad. Análisis de la relación de lluvia respecto a la orientación de los pluviógrafos, velocidad y dirección del viento también han sido analizadas. Se determinó la dirección del ingreso de las precipitaciones en las microcuencas.

En el proceso de análisis se determina la influencia que presenta en la distribución de la precipitación en las dos microcuencas, la configuración geográfica de la zona, con la presencia de elevaciones que producen un efecto barrera en el movimiento de las tormentas. Se identifica la influencia en el sector de las lluvias provenientes del sector costa y oriente del país. Se efectúa análisis con valores de intensidad de lluvia de 5, 30 y 60 minutos respecto a la gradiente altitudinal de la cuenca; en cada uno de los meses y en el periodo total analizado, determinándose su decrecimiento de acuerdo aumenta la altura (mayor altura, mas precipitación, menor intensidad).



Se establece de manera clara que la determinación de la distribución espacial de lluvia en microcuencas de una escala micro (1-10 km²) con información de una red de estaciones adaptada para una escala meso o macro (> 500 km²) nos lleva a una sobre estimación de la cantidad de lluvia presente en la microcuenca, lo que posiblemente conlleva a una sobre estimación en el volumen de agua que generan.

Antecedentes y justificación

Las precipitaciones y el caudal son las variables hidrometeorológicas más utilizadas en estudios hidrológicos. Un adecuado conocimiento de ellas permite tomar decisiones acertadas al momento de realizar diseños de obras hidráulicas, ubicación de embalses, presas y captaciones, en general, determinar la factibilidad de desarrollar los recursos hídricos. Las directrices de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1981) recomiendan que en cuencas de montaña debe existir una red de pluviómetros con una densidad de uno por cada 100 - 250 Km²; para conducir estudios regionales.

Debido a la fuerte influencia de la orografía sobre la precipitación (y en general sobre los procesos hidrológicos) en nuestras cuencas, se produce una gran variabilidad en la cantidad de lluvia registrada en distintos puntos de las mismas; esto ya ha sido analizado en otros sitios de montaña, como por ejemplo Hevesi et al. (1992).

En la sierra Ecuatoriana se desconoce a cabalidad la cantidad de agua que ingresa en forma de lluvia a una determinada cuenca hidrográfica, en principio debido a una muy limitada red meteorológica, sin embargo, incluso en la cuenca del río Paute donde existe una de las mejores redes del país (Red Hidrometeorológica de la Cuenca del Río Paute), (implementada a raíz del deslave de la Josefina), se desconoce el comportamiento de la precipitación en escalas pequeñas.

El estudio en escalas pequeñas (50-100 km²) es fundamentalmente importante debido a que la mayoría de ciudades y poblaciones captan las aguas para consumo humano y riego en este tipo de cuencas; ejemplo, para el consumo humano de Azogues se capta las aguas de la cuenca alta del río Tabacay (área aproximada 25 km²); Chordeleg para el abastecimiento de agua potable, capta las aguas del río Punguhayacu (aprox. 5 km²) y para el proyecto de riego capta en el mismo río, aguas abajo donde la cuenca tiene 13 km². El proyecto PUMA (agua potable, riego y generación hidroeléctrica) para Paute y Azogues capta aguas de diferentes fuentes, cada una de menos de 30 Km² y en total, inferior a los 100 km², casos similares para las poblaciones de Alausí y Chunchi en la provincia de Chimborazo, con captaciones para agua potable en cuencas de un área menor a 20 Km².

Los datos de precipitación utilizados para diseñar estos proyectos son tomados de estaciones que se encuentran

fuera de las microcuencas. Esto implica serios riesgos al desarrollo de los recursos hídricos por cuanto se desconoce la capacidad que tienen las microcuencas para abastecer a las poblaciones; con el tiempo los sistemas de abastecimiento de agua se vuelven vulnerables.

La cuenca hidrográfica del río Chanchán se encuentra fuertemente influenciada por los regímenes de lluvia de las regiones costa y oriente, adicionalmente en esta cuenca se presenta el fenómeno del Niño, que contribuye con eventos de valores extremos; de igual secuencia se presentan veranos que tienen características extremas.

Por estos motivos se desarrolla el presente proyecto de investigación que persigue conocer algunas características de la precipitación en nuestras microcuencas de montaña. Desde el punto de vista científico los resultados del proyecto permiten conocer con más detalle los procesos hidrológicos, especialmente las gradientes de precipitación, que tienen parte en las cuencas de montaña y aporta información valiosa sobre diseño de redes meteorológicas. Desde el punto de vista del desarrollo, el proyecto contribuye para lograr un adecuado manejo de los recursos hídricos en este tipo de cuencas, lo cual constituye uno de los puntos de partida para el manejo integrado de cuencas.

El objetivo general del proyecto se establece en: "Contribuir al conocimiento científico de los procesos hidrológicos de cuencas hidrográficas de montaña, mediante el análisis de la variabilidad espacial de la precipitación en microcuencas - aplicación a la cuenca alta del río Chanchán"

MÉTODOS Revisión Bibliográfica

La competencia por los recursos agua y suelo se incrementa día a día, produciéndose conflictos entre los usuarios. Por estos motivos el manejo del agua y del suelo para dotar de agua potable a la población, generar hidroenergía o incrementar la producción agrícola, es de suma importancia, especialmente para los países Andinos donde las condiciones topográficas son un factor limitante.

La necesidad de mejorar la representación de procesos hidrológicos y la capacidad de predecir escorrentía, ha llevado a ingenieros de recursos hídricos e hidrólogos a desarrollar nuevas teorías y conceptos. Especialmente los hidrólogos de campo han asumido la tarea de estudiar el comportamiento de los procesos hidrológicos a diferentes escalas; es por esto que hoy en día la escala hidrológica es considerado el "hot spot" de las ciencias hidrológicas. Bloschi (2001) sugiere que se deberían desarrollar métodos para identificar los procesos dominantes que controlan la respuesta hidrológica en ambientes distintos. En la misma temática, Balloffet and Quinn (1997) indican que es esencial mejorar el conocimiento

del sistema físico debido a que la habilidad para mejorar los estudios depende directamente de las bases científicas sobre la cual éstos se fundamentan. Las ciencias hidrológicas tienen el reto de mejorar el conocimiento sobre los procesos de montaña (Jansky et al., 2002).

Esto es muy importante para las regiones donde se conoce poco sobre los procesos hidrológicos, y/o donde las condiciones naturales hacen que estos sean muy variables, Este es el caso de los Andes. En este sentido, Klimes (1998) manifiesta que las regiones de montaña representan en términos prácticos, la más negra de las cajas negras en el ciclo hidrológico (haciendo alusión a los tipos de modelos hidrológicos). En general se recomienda estudiar los procesos a una escala micro (1-10 km²), para luego pasar a una escala mínima (10-100 km²), luego a una escala meso (100-500 km²) y finalmente llegar a la escala macro (> 500 km²). Con esto se podría analizar además los efectos de escala que pueden existir (Schertzer y Hubert, 2002).

Siguiendo estas recomendaciones, el PROMAS Universidad de Cuenca inicia hace 3 años un programa de investigaciones hidrológicas con el monitoreo de 4 microcuencas de montaña (de entre 1 y 2.5 km²), localizadas en el páramo, enfocando principalmente los efectos de la cobertura vegetal y uso de tierras sobre la escorrentía (Buytaert et al., 2003).

La necesidad de estudiar la variabilidad espacial de la precipitación se debe a que esta tiene un rol preponderante en los procesos de generación de escorrentía. Si bien a escala 1-2.5 km² se han detectado variaciones espaciales de los registros de precipitación, este problema es más importante para estudios de cuencas de tamaño entre 10 y 100 km²; es en este tipo de cuencas donde se realizan la mayoría de captaciones para abastecimiento de agua en nuestra región, por ende en la mayoría de los estudios hidrológicos, se sigue asumiendo que la precipitación que cae sobre la cuenca es uniforme.

Algunos estudios han sido realizados sobre este tema. Goodrich et al. (1995) analiza la variabilidad espacial de la lluvia en una cuenca de 4.4 ha., con pendientes suaves, concluye que la suposición de la uniformidad de la lluvia parece ser inválida para la microcuenca estudiada. Weingartner et al. (2003), al estudiar los eventos de crecidas e inundaciones de septiembre de 1993 en Suiza, concluye que fueron producidas por uno de los eventos más extensos de lluvia orográfica registrados; su estudio de la variación de la precipitación con la elevación permite identificar las principales subcuencas de montaña que desencadenan procesos de inundación aguas abajo. Singh (1997) estudia la influencia de la precipitación y las características de la cuenca sobre los hidrogramas, llegando a conclusiones muy interesantes sobre el efecto de la dirección de la tormenta y las pendientes del terreno sobre los caudales pico. Tang et al. (1998) encuentra que la topografía y la dirección de la pendiente son factores

muy influyentes sobre la precipitación para, diferentes puntos estudiados situados en las mismas altitudes la cantidad de precipitación es diferente. La mayor precipitación fue encontrada en la ladera hacia donde sopla el viento. Este tipo de estudios también han sido realizados para mejorar la implementación de modelos hidrológicos al determinar la incertidumbre de los parámetros del modelo (Bronsteli et al., 2002; Cimbej et al., 1999; Faurz et al. 1995; Shah et al. 1996).

Metodología

Para la determinación de la distribución de la precipitación en cuencas de montaña se realiza el análisis de la influencia de la elevación sobre los volúmenes (diarios y mensuales) e intensidades de precipitación; para el efecto se realiza un análisis de las tendencias (ajuste a curvas de tendencia) de la relación de la ubicación altitudinal de cada pluviógrafo con los volúmenes de lluvia registrados en escalas diaria y mensual.

Un tema importante a analizar corresponde a la influencia que presenta la orientación de la pendiente del terreno (dirección de la pendiente respecto al norte), también llamado aspecto del terreno, sobre los volúmenes (diarios y mensuales) e intensidades de precipitación, este análisis se realiza en forma similar al planteado para el análisis de la altura y precipitación. El aspecto del terreno se determinará en base a la utilización de un Sistema de información geográfica, con la determinación de la dirección (grados) de la pendiente donde se ubica el pluviógrafo, en referencia a la dirección norte. Para determinados eventos (mayor precipitación) en las microcuencas analizadas se realiza la determinación de la velocidad y dirección del movimiento de las tormentas como consecuencia del analizar gráficamente en intervalos de tiempo adecuados (entre 5 y 10 minutos de acuerdo a la intensidad de precipitación del evento) el desplazamiento de los picos de precipitación en cada una de las estaciones instaladas.

Se determina la influencia de la velocidad del viento sobre la intensidad de la precipitación, mediante un análisis de la relación que presentan entre ellas, para los distintos eventos que sean medidos en el desarrollo de la recopilación de información de la investigación.

Finalmente se realiza una comparación de las mediciones realizadas en la zona de estudio mediante los equipos instalados (escala micro), en relación a la información histórica disponible en la cuenca del río Chanchan (escala macro) perteneciente a la red del INAMHI, instituto rector a nivel nacional de la información hidrometeorológica a nivel de país, registros que comúnmente son utilizados como base para cualquier análisis climático o hidrológico, que deba efectuarse en las microcuencas de estudio; con la finalidad de evaluar en que tipo de error se puede incurrir, al usar información que corresponde a esta escala en distintas aplicaciones.

MATERIALES

Delimitación de la zona de estudio.

Para el estudio de la variabilidad de la precipitación en microcuencas de montaña, el proyecto considera dos microcuencas, seleccionadas dentro de la cuenca del río Chanchan provincia de Chimborazo.

Para el inicio de la investigación se procede, mediante ayuda de un análisis visual y en base a características de tamaño, forma, accesibilidad, distribución altitudinal, cobertura, entre otros, a la delimitación de la zona de estudio, estableciéndose como óptimas las microcuencas de los ríos Lise y Panamá.

En la Tabla 1.1, se presentan las características físicas de cada una, y en la Figura 3.1 se aprecia la ubicación dentro de la cuenca del río Chanchan.

Tabla 1.1. Características físicas de las microcuencas dentro del área de estudio

Característica	Lise	Panamá
Área	234.2 ha	1001.1 ha
Perímetro	6845 m	15139.1 m
Cota máxima	3240 m s.n.m.	3240 m s.n.m.
Cota mínima	1680 m s.n.m.	2040 m s.n.m.
Desnivel máximo	1560 m	1200 m

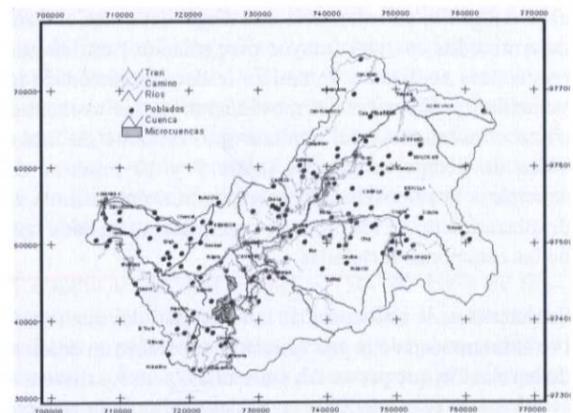


Figura 1.1. Delimitación del área de estudio dentro de la cuenca del río Chanchán

Equipamiento

En función del área de las quebradas o microcuencas definidas y en base al presupuesto del proyecto se equipan las zonas seleccionadas con 7 pluviógrafos de tipo electrónico, y una estación agrometeorológica. La ubicación de los diferentes equipos de medición se realiza en base a la combinación de dos métodos de análisis: el primero basado en las recomendaciones de Goodrich et al. (1995) de la distribución de los pluviógrafos en las zonas de estudio de una manera uniforme, sin considerar

aspectos topográficos, y un segundo basado en el análisis para dividir las microcuencas en zonas homogéneas con similares características físicas tal como recomienda Shih (1982).

En la Tabla 3.2 se establece el listado de los pluviógrafos instalados y su ubicación geográfica, en la Figura 1.2 se aprecia el mapa de ubicación de los distintos equipos.

Tabla 1.2. Equipos instalados

Nombre	UTMx	UTMy	Altura (ms.n.m.)	Tipo
Puñay	725956	9742607	3196.4	Pluviógrafo
Santa Rosa	726452	9741199	2578.6	Pluviógrafo
LLagos	724044	9738880	2666.4	Pluviógrafo
Joyagshi	726012	9737960	2811.	Pluviógrafo
Pacchala	723821	9741564	2129.5	Pluviógrafo
Chico Namza	725840	9746397	1887.4	Pluviógrafo
Namza - Lise	725404	9744935	1856.1	Pluviógrafo Est.
Namza	725665	9746066	1850.0	Climática

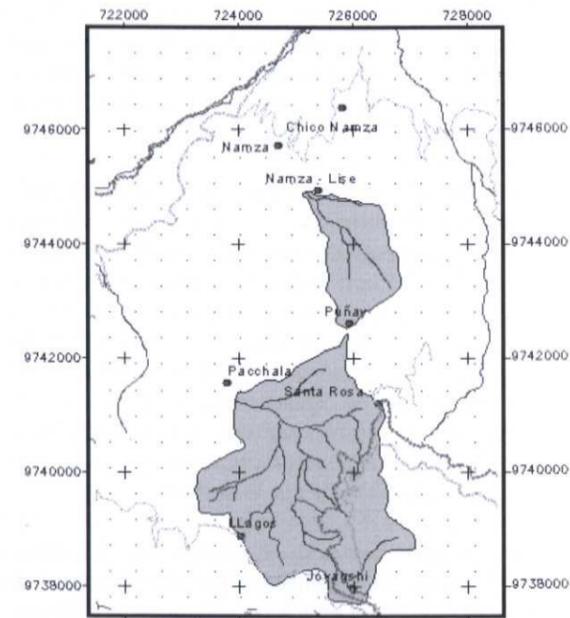


Figura 1.2 Ubicación geográfica de equipos

Registro de información

En la Tabla 1.3 se presenta la fecha de instalación y arranque de registro de información en cada uno de los pluviógrafos y el período de información disponible para la investigación. Lamentablemente por problemas relacionados con la carga de batería de los pluviómetros y la dificultad de acceso, el equipo instalado en el sector de Puñay debió ser reinstalado, como no realizó la toma de datos desde el inicio de su instalación, debiendo ser retirado para su revisión y adecuación, sin embargo para efecto de los objetivos de esta investigación, este inconveniente no afecta la calidad de los datos obtenidos.

Tabla No. 1.3 Fechas de instalación de equipos y lectura de registros de lluvia

Nombre Estación	Fecha de Instalación	Mes								
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Puñay	20-Abr-05				20					
Santa Rosa	12-Feb-05		12							21
LLagos	04-Mar-05			4						21
Joyagshi	11-Feb-05		11							21
Pacchala	11-Feb-05		11							21
Chico Namza	12-Feb-05		12							15
Namza - Lise	05-Mar-05			5						21
Namza	03-Jun-05						3			21

RESULTADOS

Influencia de la elevación sobre volúmenes diarios y mensuales e intensidades de precipitación.

Como paso previo a la definición de la influencia de la elevación sobre los volúmenes diarios y mensuales de la precipitación, se realiza un análisis de los mismos acumulados de lluvia en el período total de registros levantados

Con la información recopilada en el proyecto, se realiza un análisis de la relación entre los volúmenes acumulados de precipitación y la altura, de este análisis global se puede obtener ajustes modestos. En virtud de las características de las precipitaciones en la sierra ecuatoriana de presentar la influencia de los regímenes costa y

oriente (Torres P. 2004, Dercon et al. 2002) se procede al análisis de la información en dos épocas del año, verano e invierno. La división de la época lluviosa y seca para las series de información recopilada se realiza mediante la utilización del gráfico de la Figura 2.1.

Adicionalmente en el análisis de la relación de la altura versus la precipitación se toma en cuenta el aspecto geográfico, debido principalmente a la existencia en la zona de una gran elevación (cerro Puñay) que se convierte en ciertos casos en una pared que impide el ascenso de las nubes provenientes de la costa, o, en ocasiones en un elemento que desvía la dirección de las tormentas, lo cual hace del escenario escogido, único, permitiendo la realización de la presente investigación en los regímenes de precipitación.

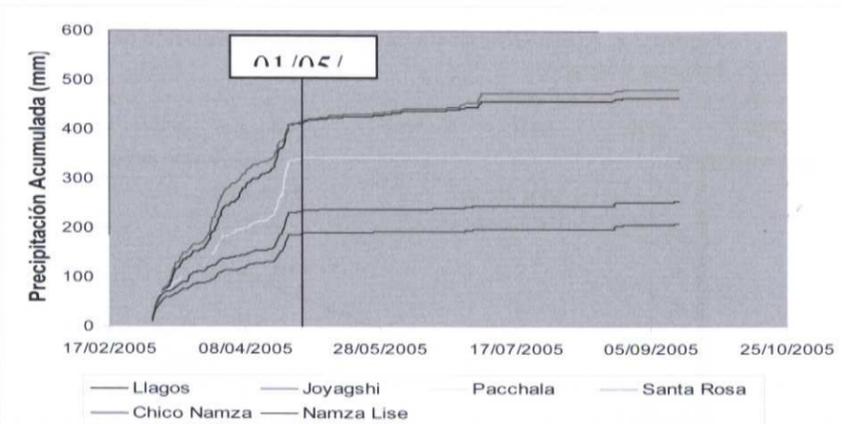


Figura 2.1. Precipitación acumulada, División de los meses de invierno y verano

Un segundo análisis realizado con la información consiste en estudiar las relaciones de las estaciones en dos grupos, el primero con la utilización de todas las estaciones (global) y el segundo únicamente con aquellas dentro de la cuenca del río Panamá. Como resultado de estos análisis se obtuvo varios ajustes lineales, en la Tabla 2.1 se presentan los valores del coeficiente de regresión.

En consecuencia en el análisis efectuado se determina que existe una correlación entre la precipitación diaria

y la altura; sin embargo la influencia que ejerce el cerro Puñay es un elemento perturbador que provoca bajos valores de ajuste. El cerro Puñay provoca que las lluvias registradas en las estaciones de Puñay y Santa Rosa sean menores, por el desvío que provoca en el ingreso de nubes a la zona, hacia los sectores donde se ubican las estaciones de Llagos y Joyagshi, provoca en ellas un mayor registro de precipitación. Por las condiciones específicas encontradas en la estación del Puñay, se la elimina del análisis, con ello se determina una relación

Tabla No. 2.1 Coeficientes de ajuste lineal; Precipitación Acumulada

	Coeficiente R ²					
	Incluido Puñay			Sin Puñay		
	Periodo	General	Panamá	Periodo	General	Panamá
Total	20/04 - 31/08	0,0016	0,006	05/03 - 21/09	0,73	0,39
Invierno				05/03 - 30/04	0,69	0,23
Verano	01/05 - 31/08	0,28	0,25	01/05 - 21/09	0,52	0,81

General = Llagos, Joyagshi, Pacchala, Santa Rosa, Chico Namza, Namza Lise
Panamá = Llaqos, Jovaqshi, Pacchala, Santa Rosa

aceptable de la precipitación en función de la altura hasta una cota alrededor de 2900 m s.n.m. (ver Tabla 4.1 y Figura. 2.2).

Durante la estación de verano los pluviómetros de Llagos y Joyagshi (subcuenca Panamá) registran mayores precipitaciones debido a su cercanía al oriente, no así los de Pachala, Puñay y Santa Rosa (ver Figura 2.3.).

La gradiente de la precipitación, en todos los casos anali-

zados se obtiene como positivo, es decir aumenta la precipitación de acuerdo al aumento de la altura. En la Tabla 2.2 se presentan las gradientes de precipitación respecto a la altura.

Análisis con precipitación mensual

En este análisis se ha tomado en cuenta las consideraciones geográficas y topográficas presentadas con anterioridad; para este caso el mejor resultado se obtiene

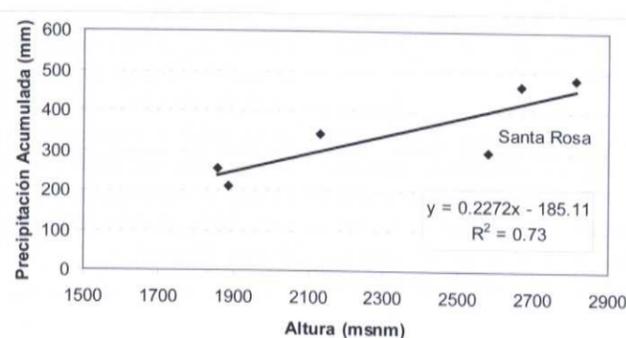


Figura 2.2. Ajuste General sin incluir Puñay, Información de Invierno y Verano.

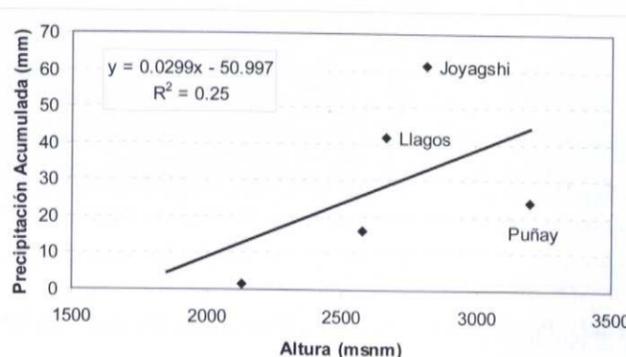


Figura 2.3. Panamá incluido Puñay, Información de Verano.

Tabla 2.2. Gradiente de precipitación respecto a la altura.

	mm/ 200 m	
	General	Panamá
Total	45.55	38.00
Invierno		21.08
Verano		16.94

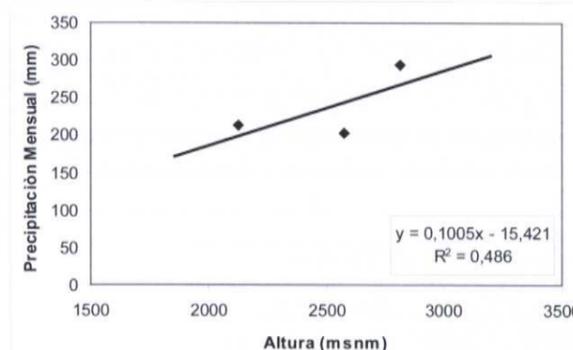
eliminando el pluviómetro ubicado en el sector de Puñay (razones ya expuestas). En la Tabla No 2.3 se muestran los coeficientes de regresión obtenidos en el análisis. En la investigación con los datos globales del proyecto, se determina que la gradiente de precipitación en todos los meses analizados, es positivo, mientras que en el caso de la microcuenca del río Panamá, se presenta una duali-

dad, gradientes ascendentes en unos casos y descendentes en otros. La Figura 2.4 (a) y (b) presenta el caso para los meses de marzo (a) y abril (b). No se puede decir que lo analizado en esta investigación es definitivo, ya que la serie existente para el análisis es menor a un año, por lo que se debe verificar esta investigación con una serie más larga de información.

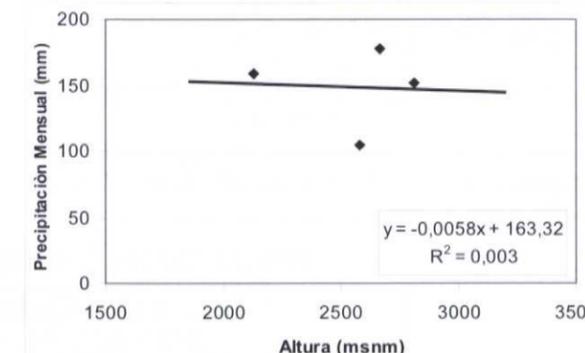
Tabla 2.3. Coeficientes de ajuste lineal; precipitación mensual

	Ajuste Precipitación Mensual			
	Coeficiente R ²			
	Incluido Puñay		Sin Puñay	
	General	Panamá	General	Panamá
Invierno				
Febrero			0,27	0,000003
Marzo			0,76	0,49
Abril			0,40	0,003
Verano				
Mayo	0,36	0,16	0,67	0,69
Junio	0,45	0,35	0,69	0,91
Julio	0,10	0,03	0,51	0,63
Agosto	0,01	0,93	0,03	0,93
Septiembre			0,52	0,37

General = Llagos, Joyagshi, Pacchala, Santa Rosa, Chico Namza, Namza Lise
Panamá = Llaqos, Jovaqshi, Pacchala, Santa Rosa



(a) Mes de Marzo.



(b) Mes de abril.

Figura 2.4. Ajuste Panamá sin incluir Puñay.

Análisis con precipitación diaria

Se efectúa con base en la determinación de la precipitación media diaria de cada una de las series de las estaciones empleadas, en función de su altura (regresión). Para el análisis se realiza una normalización de los valores de precipitación considerados en el estudio, esto, con la finalidad de uniformizar las precipitaciones de cada estación y así poder compararlas entre sí. Para el análisis no se consideran los valores de cero; la normalización se realiza mediante la relación:

$$\overline{Pr} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{Pd}{\overline{Pd}} \right)}{n}$$

Donde:

\overline{Pr} = Precipitación relativa media diaria del periodo (estación analizada)

Pd = Precipitación diaria del pluviómetro en análisis

\overline{Pd} = Precipitación promedio diaria de los diferentes pluviómetros en análisis

n = Número de días de análisis sin considerar los días de precipitación cero

El análisis, en forma análoga a las anteriores, se realiza en todo el periodo y por épocas (verano-invierno). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.4 en la

Tabla 2.4. Coeficientes de ajuste lineal; Precipitación Relativa Diaria.

	Ajuste Precipitación Relativa Diaria					
	Coeficiente R ²					
	Incluido Puñay			Sin Puñay		
	Periodo	General	Panama	Periodo	General	Panama
Total	20/04 - 31/08	0,74	0,84	05/03 - 21/09	0,59	0,63
Invierno				05/03 - 30/04	0,77	0,47
Verano	01/05 - 31/08	0,42	0,72	01/05 - 21/09	0,22	0,66

General = Llagos, Joyagshi, Pacchala, Santa Rosa, Chico Namza, Namza Lise
Panama = Llaos, Jovaashi, Pacchala, Santa Rosa

Figura 2.5 se presenta el ajuste para la subcuenca de Panamá.

En general se establece que para la determinación de la relación de la altura en referencia a precipitación diaria, se obtienen mejores resultados al analizar cada una de

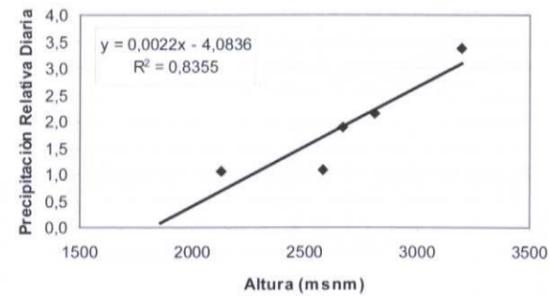


Figura 2.5. Ajuste Panamá incluido Puñay, Precipitación Relativa Diaria.

Tabla 2.5. Coeficientes de ajuste lineal; Intensidad Máxima.

	Incluido Puñay		Sin Puñay	
	General	Panama	General	Panama
5 min	0,02	0,40	0,01	0,29
30 min	0,08	0,52	0,001	0,37
60 min	0,11	0,55	0,04	0,61

General = Llagos, Joyagshi, Pacchala, Santa Rosa, Chico Namza, Namza Lise
Panama = Llaos, Jovaashi, Pacchala, Santa Rosa

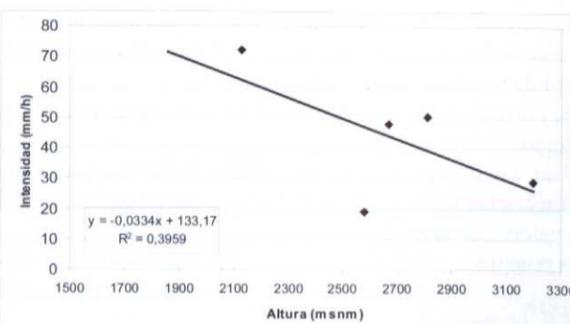


Figura 2.6. Ajuste Panamá incluido Puñay, Intensidad Máxima 5 min.

las subcuencas antes que por el análisis de forma general del sector.

Análisis con intensidad máxima

Se han obtenido las intensidades máximas para una duración de 5, 30 y 60 minutos, considerando el análisis de épocas de invierno, verano y del efecto geográfico del cerro Puñay, se realiza el estudio de la relación intensidad precipitación, obteniendo como resultado los datos de la Tabla 2.5. El mejor ajuste se determina al realizar el análisis por cada microcuenca, sin embargo los valores obtenidos no corresponden a un buen ajuste. La tendencia general encontrada en el análisis, como se observa en la Figura 2.6, es que la intensidad desciende mientras la altura aumenta. El mejor ajuste se consigue en los meses de verano. La influencia del cerro Puñay sobre la precipitación de la estación de Santa Rosa se produce por que los valores de los ajustes no son lo más adecuados.

Influencia de la dirección de la pendiente del terreno sobre volúmenes (diarios y mensuales) e intensidades de precipitación

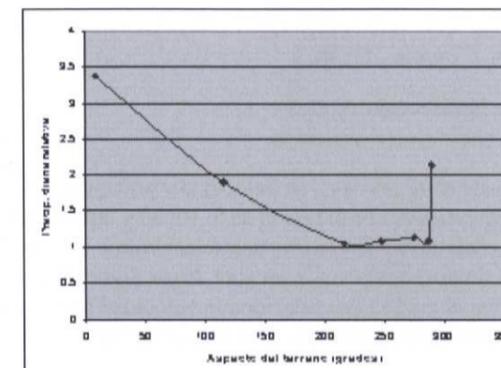
Mediante la ubicación geográfica de las distintas estaciones y con el empleo de la topografía digital de la cuenca del río Chanchan, con empleo de un GIS se ha generado un mapa de elevación digital del cual se ha derivado el aspecto del terreno, de cada una de las ubicaciones de los pluviógrafos (ver Tabla No.2,6).

Como resultado del análisis se obtienen los gráficos de la Figura No. 2.7 que relacionan el aspecto del terreno con la precipitación diaria, mensual y con las intensidades de precipitación respectivamente.

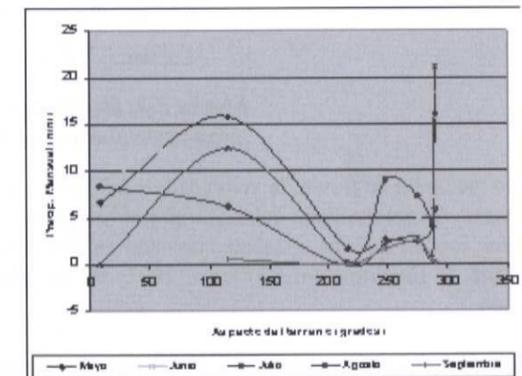
En el análisis se consideran diferentes ajustes y tendencias de los datos disponibles para la investigación, determinando que no existe ninguna relación lógica entre los datos, la única relación que se identifica es mediante el análisis de la ubicación geográfica de las estaciones, en

Tabla No. 4.6 Aspecto de las estaciones pluviográficas (grados)

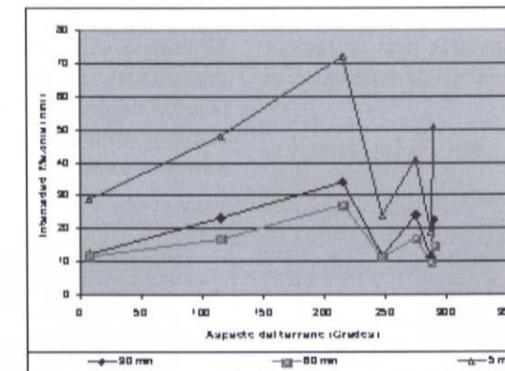
Puñay	LLagos	Pacchala	Chico Namza	Namza - Lise	Santa Rosa	Joyagshi
7.98	115.6	216.09	247.8	275.14	287.1	289.7



(a) Precipitación diaria.



(b) Precipitación mensual.



(c) Intensidades.

Figura 2.7. Relación aspecto del terreno con precipitación

ella se determina que para los registros diarios de precipitación, las estaciones que mayores registros de lluvia presentan, corresponden a aquellas que se encuentran en la margen derecha de los cursos principales (eje de la cuenca) de cada microcuenca. Para el caso las estaciones de Llagos, Joyagshi y Puñay.

Determinación de la velocidad y dirección del movimiento de las tormentas

La determinación de la dirección de las tormentas se realiza mediante el análisis de 5 de los eventos más representativos y de mayor precipitación, registrados en los

distintos pluviógrafos. El movimiento de las tormentas se determina en base al análisis gráfico del desplazamiento de los picos de precipitación de los distintos eventos, en intervalos de tiempo adecuados (entre 5 y 10 minutos de acuerdo a la intensidad de precipitación del evento) en cada una de las estaciones instaladas. En la Figura 2.8 se presenta el análisis gráfico para el evento del 4 de abril del 2005 en el cual se determina la presencia de dos tormentas.

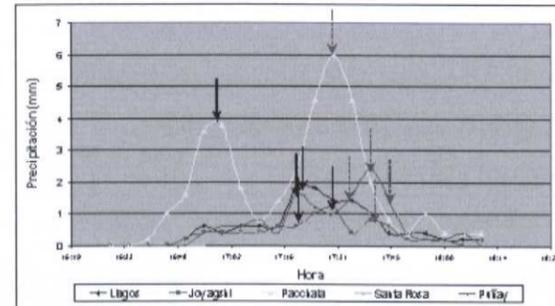


Figura 2.8. Determinación de la dirección de la tormenta, evento del 4 abril 2005

nes de medición de lluvia, la velocidad de las tormentas no puede ser determinada debido a que el movimiento del pico máximo de las tormentas ubicado en el centro del cono de precipitación (Willems, 2002) no ha sido ubicado.

Determinación de la influencia de la velocidad del viento sobre la intensidad de la precipitación.

El análisis se realiza en función de la información recopilada de la estación agrometeorológica instalada en el sector. Con los registros obtenidos para el período de investigación se realiza un análisis de tendencias de

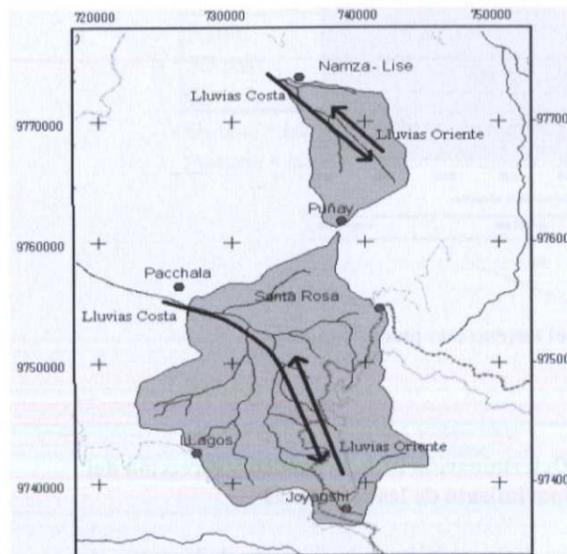


Figura 2.9. Dirección del movimiento de las tormentas.

Como resultado se concluye que la dirección predominante de las tormentas corresponde a aquella que recorre las microcuencas en sentido noroeste-sureste. Ascendiendo por la cuenca cuando las lluvias provienen del sector costa (invierno) y descendiendo cuando las lluvias provienen del sector oriental (verano) tal como se presenta en la Figura 2.9. Lamentablemente debido a las características propias de las cuencas de estudio que requieren la instalación de un mayor número de estacio-

ajuste entre los datos de velocidad y precipitación diaria, e intensidades de duración de 5, 10, 30 y 60 minutos. Del análisis no se determina una relación que vincule éstos parámetros en forma aceptable. En la Figura 2.10 se presenta el gráfico que relaciona la velocidad de viento y la precipitación con intensidad de 60 minutos.

Comparación de las mediciones realizadas en la zona de estudio con las mediciones realizadas por la Red Meteorológica de la Cuenca del río Chanchán.

El análisis se realiza en base a la determinación de la precipitación media mensual de las microcuencas, con la información de los pluviógrafos experimentales instalados, y comparados con la precipitación media determinada a partir de las estaciones de la red del INAMHI.

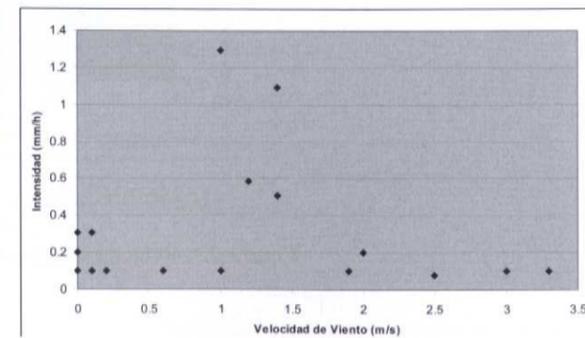


Figura 2.10. Velocidad de viento vs Intensidad de precipitación de 60 min.

La determinación de la precipitación media de cada una de la microcuencas se realiza en base al análisis espa-

cial con el método de Thiessen, y con los registros de todas las estaciones experimentales instaladas. En la Figura 2.11 se aprecia los polígonos empleados. En lo que respecta a la red INAMHI, lamentablemente en la actualidad, en la cuenca del río Chanchán se mantienen en funcionamiento 4 estaciones pluviométricas (Huigra, Alausí, Achupallas, Palmira), de las cuales la más cercana a la zona de investigación que se puede utilizar en cualquier estudio climático y/o hidrológico, es la estación de Huigra.

Una comparación adicional que se realiza, corresponde a la determinación de la precipitación media mensual de las dos microcuencas, en relación a la información histórica de las estaciones de INAMHI, en este cálculo se utilizan los registros de aquellas estaciones pluviométricas que funcionan en la cuenca, y que se encuentran cercanas a la zona de investigación, como son: Angas, Compud, Chunchi, Huigra (ver Figura 2.11).

En la Tabla 2.7 se presentan los valores de precipitación media mensual para las microcuencas de estudio, según los diferentes escenarios considerados (red de estaciones), en la Tabla 2.8 la diferencia porcentual entre cada una de ellos.

La diferencia de la precipitación media para cada cuenca, determinada a partir de los valores registrados en los pluviógrafos experimentales y los de la red INAMHI, tanto históricos como presentes en las microcuencas de Lise y Panamá, corresponden al 74% y 84% respectivamente. Valores sumamente altos para cualquier estudio de tipo hidrológico o climatológico, que de ser utilizados conllevarían a la obtención de errores muy significativos en los resultados.

Figura 2.11. Ubicación de estaciones de lluvia en la cuenca del río Chanchán y polígonos de Thiessen.

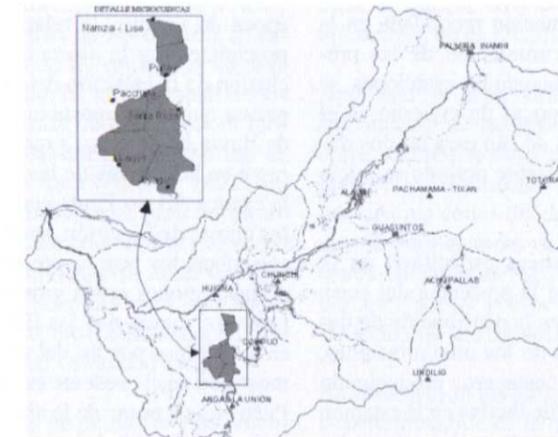


Tabla 2.7. Precipitación media mensual para las microcuencas de Lise y Panamá según registros de estaciones experimentales e históricas.

Escenario de información	Mes						Total
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	
<i>Microcuenca Panamá</i>							
Est. Experimentales	10.3	10.9	9.0	4.8	5.3	23.6	64.0
Est. Históricas	67.0	37.4	25.0	13.7	45.5	53.8	242.5
Est. Histórica 2005	0.0	0.0	0.0	3.6	0.0	6.4	10.0
<i>Microcuenca Lise</i>							
Est. Experimentales	4.7	7.1	1.3	7.9	1.7	16.1	38.7
Est. Históricas	52.9	13.4	4.3	6.9	23.0	24.0	124.5
Est. Histórica 2005	0.0	0.0	0.0	3.6	0.0	6.4	10.0

Tabla 2.8. Diferencia porcentual entre precipitaciones para las microcuencas de Lise y Panamá según registros de estaciones experimentales e históricas.

Escenario de información	Mes						Total
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	
<i>Microcuenca Panamá</i>							
Est. Históricas	648%	345%	277%	286%	860%	228%	379%
Est. Histórica 2005	100%	100%	100%	25%	100%	73%	84%
<i>Microcuenca Lise</i>							
Est. Históricas	1127%	190%	337%	87%	1319%	150%	322%
Est. Histórica 2005	100%	100%	100%	54%	100%	60%	74%

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La investigación se desarrolla en dos microcuencas del río Chanchán: Lise y Panamá, con la incorporación de 7 pluviógrafos de tipo automático y una estación climatológica completa. Se realiza el monitoreo climático por un período de 8 meses.

Del análisis gráfico de la información recopilada en la investigación, a través de la acumulación de las precipitaciones registradas en cada una de las estaciones, se determina la existencia de las épocas de invierno en el inicio de año, verano a mediados de año para las dos microcuencas, con cambio en el presente periodo se inicio en el mes de mayo.

Se determina que las características específicas en la microcuenca del río Panamá con la presencia del cerro Puñay, provocan un efecto local en la distribución de lluvias con el desvío en el ingreso de las precipitaciones, que provienen desde el sector costanero, produciendo una disminución en los registros de lluvias en la estación de Santa Rosa y un pequeño aumento en las estaciones de Llagos y Joyagshi (ver Figura 2.9).

Se analiza la relación existente entre la precipitación y la altura en las microcuencas, tanto en forma acumulada en el período, como en las escalas de tiempo diarias y mensuales. Se determina que por la presencia del cerro Puñay no se puede establecer una buena relación entre la precipitación total y la altura; sin embargo, esta particularidad geográfica, confirma ciertas características de la relación entre la precipitación y la dependencia de los regímenes oriental y occidental.

El análisis de la variación de precipitación a una escala de tiempo mensual, nos indica que sí existe una relación con la altura en las microcuencas, en mayor o menor grado, de acuerdo a la época del año que se considere. En la época de invierno, primeros meses del año, se determina un buen ajuste en la identificación de la gradiente de precipitación en función de la altura, cuando no se considera la estación pluviográfica ubicada en el cerro Puñay (3100 ms.n.m.). La razón por la cual no se considera, radi-

ca en que las nubes provenientes del sector costanero, ascienden por el curso del río Chanchán, e ingresan a las dos microcuencas, pero este avance se produce hasta una altura de 2900 ms.n.m. por el efecto orográfico, produciéndose una concentración de lluvias en este nivel (aumenta precipitación en estaciones a esta altura).

Por el contrario, en los meses que corresponden a la época de verano, la relación que se encuentra entre la precipitación y la altura es aceptable, incluso con la inclusión de la estación del cerro Puñay. Esto nos lleva a pensar que el comportamiento en la distribución espacial de lluvia en la zona, presenta un comportamiento diferente en las épocas de invierno y verano, al igual que en la cuenca del río Paute corresponde a la característica de los climas de la región Andina (Dercon et. al., 1998) que son afectados por la presencia de las épocas lluviosas de las regiones costa y oriente; con la influencia en los primeros meses por las lluvias de la región costanera y en los últimos por las del sector oriental. Esto ha sido demostrado en el presente estudio por la presencia del cerro Puñay que a pesar de la altura, su precipitación establece la dependencia de los regímenes oriental y occidental superiores a las tendencias precipitación versus altura.

Adicionalmente esta suposición se confirma cuando se analiza la tendencia de las gradientes de precipitación. En los meses de invierno, correspondiente a la época de lluvia de la región costa, presenta una gradiente positiva; es decir, crece según aumenta la altura; pero en los meses de verano, en los cuales la lluvia en el sector costanero disminuye, la gradiente va decreciendo, incluso en los meses de agosto y septiembre, cuando se inician las lluvias en la región amazónica del país, (últimos meses de registros) las gradientes de precipitación en las microcuencas se vuelven negativas.

La inversión de la gradiente en los último meses del año se justifica por la orientación de la cuenca y la ubicación de los pluviógrafos; es decir, al presentar las microcuencas una orientación oeste-este se produce que a mayor distancia del oriente menor precipitación y menor elevación del terreno.

Un aspecto muy importante que se determina en la investigación, consiste en el establecimiento de que los valores de la intensidad de lluvia de 5, 30 y 60 minutos respecto a la altura de la cuenca; en cada uno de los meses y en el periodo total analizado, decrece de acuerdo con el aumento de la altura (mayor altura, mas precipitación, menor intensidad).

Se establece que no existe influencia sobre la distribución espacial de lluvia, de parámetros como la dirección del terreno (ángulo respecto del norte) y velocidad e intensidad del viento. A pesar de ello se identifica mediante el análisis de la ubicación geográfica de las estaciones, que aquellas estaciones que se encuentran en la margen derecha de los cursos principales (Llagos, Joyagshi y Puñay) presentan en un alto porcentaje en la escala de tiempo diaria, los mayores registros de lluvia.

La dirección predominante de las tormentas corresponde a aquella que recorren las microcuencas en sentido sur-este. Ascendiendo por la cuenca cuando las lluvias provienen del sector costa (Invierno) y descendiendo cuando las lluvias provienen del sector oriental (verano) tal como se presenta en la Figura 2.9. Lamentablemente debido a las características propias de las cuencas en estudio que requieren la instalación de un mayor número de estaciones de medición de lluvia, la velocidad de los eventos no puede ser determinada debido a que el movimiento del pico máximo de las tormentas ubicado en el centro del cono de precipitación (Willems, 2002), no puede ser ubicado. Ante lo manifestado, para un futuro monitoreo se recomienda la instalación en la parte central de las microcuencas de tres pluviógrafos adicionales, y un posterior monitoreo en la época invernal para poder determinar de la mejor manera el movimiento del pico de la tormenta y en consecuencia su velocidad media.

El estudio de cuencas a escalas pequeñas es fundamentalmente importante debido a que la mayoría de ciudades y poblaciones, captan las aguas para consumo humano y riego de este tipo de cuencas. Los datos de precipitación utilizados para diseñar estos proyectos son tomados de estaciones que se encuentran fuera de las microcuencas. Esto implica serios riesgos en el desarrollo de los recursos hídricos, por cuanto se desconoce la capacidad que

tienen las microcuencas para abastecer a las poblaciones, con el tiempo los sistemas de abastecimiento de agua se vuelven vulnerables. En este contexto se determina la precipitación media para las microcuencas de Lise y Panamá de 2.3 y 10.01 km² respectivamente (escala micro), de las precipitaciones establecidas en función de las lluvias determinadas dentro de cada microcuenca y aquellas obtenidas de acuerdo a los valores externos, correspondientes a los de la cuenca principal (escala meso); de su comparación se determina una diferencia del 74% y 84 % para Lise y Panamá respectivamente. Esta diferencia nos da luces de los errores sumamente graves en los que se puede incurrir cuando no se posee una adecuada densidad de estaciones en aquellas microcuencas, en las cuales se implementen obras de infraestructura, que dependen de la estimación de caudales a partir de datos de lluvia existentes.

Si no existe una correcta determinación de la distribución espacial de lluvias en microcuencas, se puede incurrir en graves problemas para la determinación de la disponibilidad del recurso hídrico, y la generación de un sinnúmero de problemas sociales que puede generar este establecimiento erróneo de la cantidad de agua de los diferentes cursos fluviales.

Ante esto, se debe poner principal énfasis en el dimensionamiento de los posibles errores en los cuales se incurrir, cuando se determinan caudales de acuerdo a los niveles de información pluviográfica que se dispone, ya que errores como los detectados en la presente investigación para cuencas de hasta 10 Km², de sobredimensionar alrededor del 80% en el volumen de la cantidad de precipitaciones, provocaría grandes errores en la determinación de la disponibilidad de recursos hídricos.

En resumen, la investigación nos da claras luces de que la determinación de la distribución espacial de lluvia en microcuencas de una escala micro (1-10 km²) con información de una red de estaciones adaptada para una escala meso o macro (> 500 km²) nos lleva a una sobre estimación de la cantidad de lluvia presente en la microcuenca, lo que posiblemente conlleva a una sobre estimación en el volumen de agua que genera.

BIBLIOGRAFIA

- Balloffet and L. Quinn, 1997. Special Issue on Decision-Support Systems (OS S) (Journal of Hydrology Vol. 177, Nos. 3-4) Comment. Journal of Hydrology 199,207-210.
- Blöschl, G., 2001. Scaling in hydrology. Hydrological processes 15, 709-711.
- Bronstert, A., O. Niehoff y G. Bürger. 2002. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. Hydrological Processes (16) 509-529.
- Buytaert, W., R. Célleri, B. De Bievre, J. Deckers y G. Wyseure, 2003. Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el sur del Ecuador con TOPMODEL. Memorias del III Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Arequipa, Peru.
- Dercon G., Bossuyt B., De Bievre B., Cisneros F., Deckers J. (Editores), 1998, Zonificación Agroecológica del Austro Ecuatoriano, U. Ediciones, Universidad de Cuenca - Ecuador
- Faurés, J.M., DD. Goodrich, A. Woolhiser, S. Sorooshian, 1995. Impact of small scale spatial rainfall variability on runoff modeling. Journal of Hydrology 173, 309-326.
- Goodrich, D., J.M. Faurés, D. Woolhiser, L. Lane and S. Sorooshian, 1995. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability. Journal of Hydrology 173,283-308.
- Hevesi, J.A., A. Flint y J. Istok, 1992. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I: structural analysis. J. Appl. Meteor. 31, 661-676.
- Jansky, L., J. Ives, K. Furuyashiki and T. Watanabe, 2002. Global mountain research for sustainable development. Global environmental change 12,231-239
- Klemes, V., 1998. Foreword, In: IAHS Publication No. 190, Wallingford.
- Pardo-Igúzquiza, E., 1998. Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. Journal of Hydrology 210, 206-220.
- Schertzer, D., Y.P. Hubert, 2002. Extreme Variability of Hydrological Fields, Scaling, Remote Sensing and Prediction. Proceedings of the Preparatory Workshop on the IAHS Initiative for the Prediction in Ungauged Basins (PUBs). 28-29 March 2002. Kofu, Japan
- Singh, V. P., 1997. Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph. Hydrological Processes 11,1649-1669
- Shah, S.M.S., PE. O'Connell, JRM. Hosking, 1996a. Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. 1. Formulation and calibration of a stochastic rainfall field model. Journal of Hydrology 175, 67-88.
- Shah, S.M.S., PE. O'Connell, JRM. Hosking, 1996b. Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. 2. Experiments with distributed and lumped models. Journal of Hydrology 175,89-111.
- Tang, C., S. Shindo and I. Machida, 1998. Topographical effects on the distributions of rainfall and 180 distributions: a case in Miyake Island, Japan. Hydrological Processes 12, 673-682
- Torres P., Análisis de la distribución espacial de lluvias en la cuenca del río Paute, Tesis previa a la obtención del título de Master en Ciencias, Universidad de Cuenca, Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, Cuenca - Ecuador.
- Weingartner, R., M. Barben and M. Spreafico, 2003. Floods in mountain areas--an overview based on examples from Switzerland. Journal of Hydrology 282, 10-24.