



Intentos para determinar los efectos de la cubierta forestal en el caudal de ríos, mediante mediciones hidrológicas directas en Los Negros, Bolivia

Valentin Le Tellier^{a,1}, Alex Carrasco^b, Nigel Asquith^{c,2,*}

^a AgroParisTech-ENGREF, Campus d'Agropolis 648 rue Jean-François Breton, BP 7355, 34 086 Montpellier cedex 4, Francia

^b Universidad Autónoma Gabriel René Moreno, Facultad de Ciencias Agrícolas, Carrera de Ingeniería Forestal, Programa de Investigaciones (PROINFOR), El Vallecito, Carretera al Norte Km 8.5, Casilla Postal 3051, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia

^c Property and Environment Research Center, Lone Mountain Fellows Program, 2048 Analysis Drive Suite A, Bozeman, MT 59718, EE.UU.

INFORMACION DEL ARTICULO

Historia del Artículo:

Recibido el 19 de octubre de 2008

Artículo revisado, recibido el 21 de abril de 2009

Aceptado el 27 de abril de 2009

Palabras clave:

Pago por servicios ambientales

Hidrología

Monitoreo

Bolivia

RESUMEN

Un aspecto fundamental en muchos esquemas de pago por servicios hidrológicos (PSH) en bosques montano tropicales es la hipótesis de que existe una relación directa entre la cubierta forestal y el caudal de los ríos en la época seca. Desarrollamos un programa de investigación de bajo costo para evaluar la relación entre la cubierta forestal-caudal de los ríos en la cuenca Los Negros, al este de Bolivia, y nos hicimos tres preguntas: (1) ¿pueden cuencas que son lo suficientemente similares como para llevar a cabo estudios de “cuencas en pares” ser identificadas sólo considerando parámetros simples, tales como el tamaño, aspecto y proximidad?; (2) ¿se puede establecer un sistema de monitoreo de manera local, con menos de \$US 10 000, entrenando pobladores locales para la recolección de datos hidrológicos?, y (3) ¿pueden esos datos ser utilizados para mejorar el funcionamiento de una iniciativa de PSH? Un mapa de uso del suelo de la parte alta del Valle de Los Negros fue creado a partir de imágenes Landsat del año 2005 y un modelo de elevación digital fue usado para calcular las propiedades físicas e hidrológicas de 10 sub-cuencas. Agricultores midieron las tasas de flujo de caudal en esas sub-cuencas del 2005 al 2008 y se hicieron cargo de 10 pluviómetros automáticos. Encontramos que no existe relación entre la cubierta forestal y el caudal de los ríos, lo que indicaría que esta relación no existe, pero también podría ser el reflejo del corto periodo de estudio, la baja calidad de los datos y el hecho de que las sub-cuencas tienen relativamente la misma cubierta forestal (54-76%). Llegamos a la conclusión que (1) cuencas pueden ser identificadas como “suficientemente similares para el análisis” usando los criterios de tamaño, aspecto y proximidad sin comprometer futuras investigaciones, (2) se puede desarrollar un sistema útil de monitoreo hidrológico por menos de \$US 10 000 y (3) aunque nuestros agricultores locales no colectaron datos con una calidad suficientemente alta como para explorar la relación bosque /agua en Los Negros, con ciertas mejoras en las metodologías, a un bajo costo, el sistema de monitoreo a nivel local tiene el potencial de ser un componente importante para futuras iniciativas de PSH. Recomendamos que la descarga los ríos debería calcularse directamente; que solamente los criterios hidrológicos más relevantes, en vez de todos los criterios científicos sean monitoreados; que se institucionalice el sistema de monitoreo a nivel local, para reducir el cambio constante de personal y que el monitoreo hidrológico este dentro de un contexto que lo haga socialmente aceptable.

* Autor con quien mantener correspondencia: Center for International Development, Kennedy School of Government, Harvard University, 79 JFK Street, Cambridge, MA 02138, USA. Tel.: +1 617 495 1417; fax: +1 617 496 8753. E-mail address: nigelasquith@yahoo.com (N. Asquith).

¹ Dirección actual: Beaulieu, 1730 Route de Saint Jean du Gard, 30140 Anduze, France.

² Dirección actual: Sustainability Science Program, Center for International Development, Kennedy School of Government, Harvard University, 79 JFK Street, Cambridge, MA 02138, USA.

1. Introducción

Pagos por servicios ambientales (PSA) son una forma de incentivo cada vez más comunes para el manejo de recursos naturales (Asquith y Wunder, 2008). PSA se puede definir como una transacción condicional voluntaria por un servicio ambiental específico (o servicio obtenido por el uso de la tierra) entre al menos un comprador y un vendedor (Wunder, 2005). Debido a que los servicios hidrológicos son valiosos para la mayoría de las comunidades, estos son quizás uno de los servicios ambientales más adecuados para desarrollar un programa de incentivos a nivel local, tal como el PSA.

Aunque varios de los sistemas de pagos por servicios hidrológicos (PSH) en Latino América han sido estudiados y analizados por investigadores (Robertson y Wunder, 2005), se ha prestado poca atención a algo que tal vez es la base más importante de dichos sistemas: las características hidrológicas de las cuencas que son las que supuestamente proporcionan el servicio ambiental. En la mayoría de los casos, simplemente se asume que reduciendo la degradación forestal se mantendrá el caudal del agua.

En otras palabras, la mayoría de los sistemas existentes de PSH tienen como base fundamental la suposición no probada de que existe una relación directa entre el bosque y el agua (Landell-Mills y Porras, 2002).

Medir el flujo biofísico de cualquier servicio ambiental es complejo (Cowling *et al.*, 2008, Jack *et al.*, 2008): cuantificar la escala, el alcance y valor de los servicios de la cuenca toma mucho tiempo y es costoso. Una manera típica de llevar a cabo experimentos, como un análisis “cuencas en pares”, toma entre 5 y 10 años para que la respuesta a los efectos del tratamiento puedan registrarse a través de condiciones relativamente secas, relativamente húmedas y condiciones promedio (Jeanes *et al.*, 2006). Además, los resultados de tales experimentos no pueden ser extrapolados directamente a otros lugares, donde aspectos como el suelo, vegetación y patrones de precipitación son diferentes (Jeanes *et al.*, 2006).

Existe entonces, una necesidad urgente de desarrollar herramientas que puedan medir y mostrar si los bosques están realmente proporcionando servicios ambientales, así como para cuantificar el efecto del cambio en el uso del suelo en la provisión de servicios ambientales. El Centro Mundial de Agroforestería (ICRAF) ha liderado acciones para el desarrollo de un modelo de evaluación hidrológica rápida (EHR) (Jeanes *et al.*, 2006) que ha sido

probado en un serie de cuencas de Asia (por ej., la cuenca del Lago Singarak en el oeste de Sumatra). Esta EHR, diseñada para ser completada en 6 meses y con menos de \$US10 000, consistía principalmente en realizar modelos, consultas y discusiones acerca de las percepciones de varias instancias involucradas en la cuenca. La metodología EHR del ICRAF se basa mínimamente en la recolección de datos hidrológicos en campo.

Con un enfoque diferente a la metodología EHR del ICRAF, partimos de la hipótesis que los agricultores locales podrían ser entrenados para recolectar datos útiles de caudales (profundidad y velocidad) y precipitación. Nuestra meta fue ver si a un bajo costo (<\$US10 000) y en un periodo corto de tiempo (<3 años) agricultores locales podrían recolectar datos científicos que serían lo suficientemente útiles y confiables como para clarificar si existe una relación entre cubierta forestal e hidrología.

Para tratar de cuantificar un fenómeno temporal (por ej., que haya una disminución del caudal debido a un proceso continuo de deforestación), nos formulamos la siguiente pregunta a manera de hipótesis: dentro de una cuenca más grande, sub-cuencas que ya están parcialmente deforestadas, ¿producirán menos agua en época seca que aquellas sub-cuencas que han mantenido su cubierta forestal?. Nuestra investigación tuvo lugar en el valle Los Negros en Bolivia, donde ya se viene desarrollando un sistema de PSA (Asquith *et al.*, 2008) y nuestro interés principal fue encontrar las diferencias de caudal en la época seca, cuando la escases de agua es a menudo un factor limitante para la producción agrícola de la región.

Existen muchos desafíos cuando se involucra gente del lugar para monitorear los resultados de la medición de los recursos naturales, pero nuestra investigación se basó en la suposición de que si el pago por servicios hidrológicos llegara a ser una herramienta ampliamente difundida, entonces su monitoreo debe ser sostenible. Por esta razón, los protocolos de monitoreo deben ser fáciles de seguirse, tener un bajo costo y estar relacionados con el quehacer local (Evans y Guariguata, 2008).

Debido a que es muy probable que los poco entrenados trabajadores requieran establecer y encargarse del sistema de monitoreo a nivel local, hemos descrito las lecciones aprendidas durante la implementación del protocolo de prueba y propuesto una serie de recomendaciones para aquellos que deseen involucrarse en el diseño o implementación de esquemas de compensación de cuencas.

Específicamente, en este artículo nos preguntamos:

(1) ¿pueden cuencas que son lo suficientemente similares como para llevar a cabo estudios de “cuencas en pares” ser identificadas sólo considerando parámetros simples, tales como el tamaño, aspecto y la proximidad geográfica?;

(2) ¿se puede establecer un sistema de monitoreo de manera local, con menos de \$US 10 000, entrenando pobladores locales para la recolección de datos hidrológicos?, y

(3) ¿pueden esos datos ser utilizados para mejorar el funcionamiento de una iniciativa de PSH?

2. Descripción del área de estudio

Santa Rosa de Lima es una comunidad situada en la parte alta de la cuenca de Los Negros (17844'S, 63826'W), en el Municipio de Pampagrande, Provincia Florida, Departamento de Santa Cruz. Santa Rosa tiene un clima cálido-templado y características entre húmedo y sub-húmedo. La temperatura promedio anual es de 19°C con un rango entre 13 y 23°C. Se distinguen dos estaciones: la estación lluviosa entre octubre y abril cuando se registra 63-78% de la precipitación anual y la estación seca entre mayo y septiembre (Prefectura de Santa Cruz, 2007).

Los puntos de estudio estuvieron comprendidos entre las 5100 ha de la cuenca de Santa Rosa donde se consideraron los tributarios de dos quebradas: Pailón y Agua Blanca, que juntas forman el río Santa Rosa (Fig. 1). La parte alta de estas sub-cuencas están normalmente cubiertas por nubes o rocío. Las particulares condiciones climatológicas de estos bosques “nublados” montano tropicales hacen que los árboles tengan un aspecto inusual: tienen pequeña estatura, son retorcidos y están cubiertos por muchas epifitas, como briofitas, bromélicas, líquenes y helechos. Los bosques montano tropicales juegan un papel hidrológico importante al capturar la humedad del ambiente (intercepción horizontal) y devolverla al suelo en forma de gotas de agua, proporcionando condiciones climáticas que limitan la pérdida de agua por transpiración. Ambos efectos contribuyen al incremento de caudal, especialmente en la época seca (Bruijnzeel, 2004, Bruijnzeel y Proctor, 1995).

El uso del suelo en el área de estudio fue determinado mediante la interpretación de imágenes de satélite del año 2005 (Carrasco, 2008) y se ha visto que este varía a través del área, encontrándose que 63% es bosque nublado, 18% es bosque húmedo, 3% bosque secundario, 6% pastizales y 10% sembradíos. Analizamos ~60% de la información georeferenciada del área de estudio en junio del 2008 para

confirmar la precisión de los datos del año 2005 y encontramos que hubo muy poca deforestación entre los años 2005 y 2008. Se encontraron solamente tres nuevas áreas deforestadas que oscilaban entre 0,3 y 0,8 ha, lo que indica que la deforestación para el área de estudio entre el 2005 y el 2008 fue de 0,05% (Le Tellier, 2008).

Este valor es mucho menor que el que se registra a nivel nacional, que fue de 0,4% entre 1990 y 2000 y de 0,5% para el periodo comprendido entre 2000 y 2005 (Food and Agriculture Organization, 2006). Esto se debe, probablemente, a que el área de estudio es un lugar con pendientes pronunciadas, inaccesible y cubierto por suelos pedregosos. Debido a que el cambio en el uso del suelo durante el periodo de estudio fue tan bajo, y por el rango de precisión de las imágenes satelitales que se usaron para crear el mapa, usamos los datos del año 2005 para nuestro análisis.

3. Métodos y técnicas

Nuestro trabajo de investigación fue llevado a cabo en tres etapas:

1. Primero, identificamos las 10 sub-cuencas usando tres criterios simples: proximidad, aspecto y tamaño similar. Después, delimitamos las 10 micro-cuencas y generamos su red de afluentes usando el tratamiento de Modelo Digital de Elevación en ArcMap® (celdas de 30 m x 30 m) en base a una Imagen de Radar de la NASA. El principio general que usamos consiste en considerar pixeles que descargan en un área mayor a un área límite establecida S_0 ($S_0 = 16$ ha, en nuestro estudio) (Moussa, 2003). Una vez que cada sub-cuenca ha sido mapeada, calculamos una serie de coeficientes hidrológicos para evaluar si las cuencas eran en realidad similares, como habíamos supuesto.

2. Segundo, entrenamos agricultores locales para recolectar datos de precipitación y caudal en cada una de estas sub-cuencas entre el 2005 y el 2008. Comparamos los datos de la medición de caudales con los patrones de uso del suelo para evaluar si existe alguna relación entre cubierta forestal e hidrología.

3. Finalmente, evaluamos si nuestros protocolos de investigación habían funcionado y si los datos recolectados habrían ayudado en el desarrollo del esquema de PSH a nivel local, e identificamos las lecciones aprendidas más importantes.

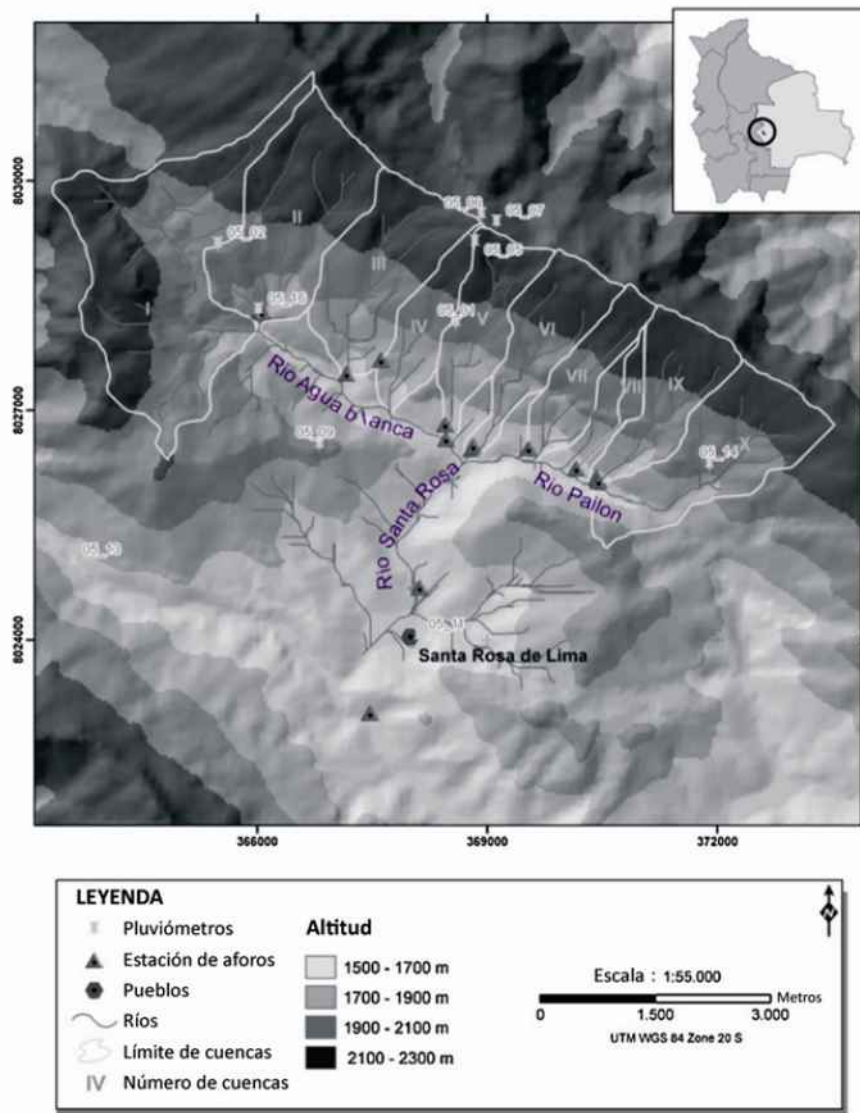


Fig. 1. Localización de los pluviómetros, estaciones de medición de caudales y cuencas estudiadas alrededor de Santa Rosa en el valle Los Negros, Bolivia.

3.1. Comparación entre cuencas

Varios factores influyen en las características hidrológicas de las cuencas, como por ejemplo las propiedades morfométricas e hidrográficas, el suelo y la geología (Moussa, 2003). Para aislar el efecto de la variable que nos interesa –uso del suelo– escogimos 10 sub-cuencas de tamaño y aspecto parecido y que estuvieran situadas cerca las unas a las otras para tratar de factorizar otros efectos, tales como la geología y la geomorfología (Fig. 1). Supusimos que este tipo de identificación “rápido y sencillo” basado en criterios fáciles de entender será suficiente para identificar sub-cuencas que podrán ser experimentalmente “apareadas” basándonos en la cobertura del suelo.

Para evaluar si las sub-cuencas escogidas eran suficientemente similares como para ser consideradas provenientes de la misma población, estimamos y comparamos las siguientes características de la cuenca:

1. Área de drenaje de la cuenca, que constituye el área de recepción de la precipitación y el área de alimentación para determinado canal, por lo que tiene gran importancia en la recolección de agua.
2. Altitud promedio, de gran importancia en relación a la cantidad de lluvia (ver más abajo).
3. Aspecto y exposición al viento dominante (evaluado a través del índice derivado del aspecto), que influye en la cantidad de lluvia colectada por la cuenca, dependiendo de su posición en relación a la dirección dominante del viento (que sopla del norte en la zona de estudio).

4. Pendiente de ladera promedio, que ayuda a describir la topografía de la cuenca. La pendiente está relacionada con el tiempo necesario para que el agua alcance el curso del río.

5. Forma de la superficie de la cuenca, cuantificada mediante el índice de Gravelius (k_c) Tte Chow *et al.*, 1988).

6. Longitud de la cuenca, que es la distancia curvilínea medida a lo largo de la corriente principal desde la toma hasta un punto que representa la proyección del centro de gravedad de la cuenca (Musy, 2003). Esta longitud influye en la velocidad a la que el agua es liberada a los ríos.

7. Densidad de drenaje, que es la relación entre la longitud de los segmentos del canal y la superficie total de la cuenca.

8. Proporción de bifurcación, es la medida cuantitativa de las redes de ríos y quebradas, es decir, el número de segmentos de un determinado orden en una cuenca hidrográfica en relación al número de segmentos de la orden superior (Te Chow *et al.*, 1988).

Una vez hechos los cálculos para las 10 sub-cuencas, aplicamos una prueba estadística en cada una de las variables para evaluar si las cuencas estudiadas podrían ser consideradas perteneciente a una misma población (es decir, si realmente comparten los mismos valores para cada variable). Asumimos la siguiente teórica lógica: si X es una variable de interés, llamémosle x_i al valor X de las cuencas i . El comportamiento de la población puede ser resumido por una distribución estadística del valor medio de μ y desviación estándar de δ . Supongamos que esta distribución, donde $N(0,1)$, es una distribución normal ($\mu = 0$, $\delta = 1$). Asumiendo una distribución normal, hay una probabilidad del 95% de que un determinado punto x_i de esta población haya alcanzado un valor $[-2; 2]$ en el intervalo de confianza. Por lo tanto, es muy improbable ($P = 5\%$) que un punto esté fuera de este intervalo.

Este enfoque teórico fue adaptado para el conjunto de datos. Sin embargo, la distribución real es desconocida y por lo tanto tiene que ser comparado con un valor teórico conocido. Supusimos en primer lugar que la variable de interés se acercó a una distribución normal, según lo sugerido por el teorema de límite central, a pesar de que estábamos trabajando con una muestra pequeña (10 puntos).

La distribución adecuada de la población de cuencas sólo se conoce parcialmente a través de las 10 cuencas hidrográficas estudiadas y por lo tanto μ y δ no se conocían y sólo se estimaron a través de los valores promedio del conjunto de datos y su desviación estándar.

Por esto, utilizamos la distribución de Student en lugar de una distribución normal. Teniendo en cuenta que este último supuesto todavía puede ser impreciso debido a que las variables pueden presentar distribuciones asimétricas, usamos transformaciones Box-Cox para normalizar las distribuciones (NIST / SEMATECH, 2003). Para nuestros análisis utilizamos distribuciones estadísticas con datos ajustados, donde los valores extremos fueron minimizados. Esto hizo que la prueba tenga un carácter más conservador, excluyendo los valores y las cuencas sólo cuando era improbable que pertenezcan a la misma población.

Una vez que una o varias cuencas fueron excluidas por estar fuera del intervalo de confianza, el tamaño de la muestra del estudio cambió, y se hizo una nueva ronda de estimaciones con el nuevo tamaño de la muestra. Se realizó otra prueba con los nuevos valores estimaciones para μ y δ , y se hicieron repeticiones hasta lograr la estabilización, es decir, hasta que todos los puntos estén dentro del intervalo de confianza.

3.2. Relación hidrológica entre la precipitación, el caudal y la cubierta forestal

Para ver si la cubierta forestal afecta el flujo de caudal, se calculan dos variables: la precipitación de ingresar a la cuenca, y el caudal de descarga a la salida de cada sub-cuenca. La precipitación se midió directamente en cada uno de los 10 puntos, y se calcularon los valores promedio para cada cuenca. La profundidad del lecho y la velocidad de la corriente se midieron directamente y se utilizaron para calcular la descarga. A continuación, se hizo una regresión de la descarga de agua en la época seca con relación a la cubierta forestal para cada sub-cuenca.

3.2.1. Precipitación

El año 2005 se instalaron diez pluviómetros de 0,25mm (Rainwise, BarHarbor, Maine, con un costo de \$US 300 por pluviómetro) que cubrían el rango altitudinal del estudio (1590-2381 m). La ubicación de algunos de estos pluviómetros no era el óptimo, debido a dificultades para acceder al dosel del bosque nublado. Los pluviómetros fueron atendidos y la información de los mismos fue descargada por un técnico capacitado, al menos una vez cada 4 meses. Estos pluviómetros fueron colocados de manera agrupada, en lugar de ser distribuidos al azar o de forma homogénea en el área de estudio, debido a los pocos caminos de acceso existentes. Uno de los 10 pluviómetros instalados fue destruido a mediados del proyecto por una persona desconocida, mientras que los datos de otro (pluviómetro 05_7) eran anormalmente bajos en

comparación con los datos anuales de otros pluviómetros instalados en el mismo rango altitudinal. Los datos de estos dos pluviómetros fueron excluidos del análisis. Por el contrario, los datos del pluviómetro 05_13 se utilizaron en el análisis de regresión, a pesar de que estaba situado fuera de la zona de estudio, pues mostró resultados comparables a los obtenidos en el sitio de estudio.

Existen varios métodos para extrapolar los datos de los registros específicos: considerando el número de medidores, la heterogeneidad de la zona de estudio y la dificultad relativa de cada método, hemos realizado la regresión de la precipitaciones con una serie de variables, como: altitud, distancia de la cumbre y la exposición a la dirección dominante del viento (evaluado a través del índice de aspecto derivado) con relación al pluviómetro (Musy, 2003).

Las regresiones fueron lineales y se controlaron sus supuestos: (normalidad, homocedasticidad e independencia) fueron controlados. Se prestó especial atención al comportamiento de aquellos datos cuyos eran muy altos y su dispersión más alta. El análisis estadístico se realizó con la versión Professional 3del S-PLUS 2000, considerando un margen del 5% de significancia.

Nuestro plan inicial era utilizar los datos de precipitación promedio del período 2005-2008 pues sus ajustes estadísticos respecto a la altitud eran en general buenos. Sin embargo, Bolivia está influenciada por el fenómeno El Niño y por esta razón se pueden presentar características muy distintas de las precipitaciones de un año para otro, como fue el caso entre 2005 y 2008. Como consecuencia de ello no era adecuado promediar los valores para los diferentes años, por lo que se realizaron las relaciones de regresión mes por mes.

Treinta y cuatro regresiones (correspondientes a los 34 meses de registro) fueron sometidos a pruebas de los cuales 15 mostraron resultados significativos ($P < 0,05$) para esas condiciones. Se utilizó otro método para los 19 meses, en los cuales no se pudo encontrar una regresión lineal significativa entre la altitud y la precipitación mensual (sobre todo en la estación seca, cuando la dispersión fue mayor). Este método fue inspirado por el CLAS (2006) y se basó en la observación de que para un determinado mes, la relación de la precipitación mensual/anual es relativamente estable para toda la cuenca y que sigue patrones anuales similares. Los valores de la relación promedio nos permitieron estimar los datos de precipitación mensual que faltaban para cada cuenca.

3.2.2. Mediciones de la velocidad de la corriente y la profundidad del lecho

Se instalaron estaciones de aforo en 14 lugares a lo largo de los arroyos de la zona: seis en el área de Río Agua Blanca, seis en el área de Río Pailón, y dos en el Río Santa Rosa. Diez de las 14 estaciones se utilizaron en este estudio, que se encuentra en los puntos de salida de la sub-cuenca. Los otros cuatro fueron diseñados para el control de las otras estaciones de aforo o para medir los cambios en el cauce del río principal del valle.

La identificación de agricultores locales como potenciales recolectores de datos se la realizó de boca en boca y se contrató aquellas personas que manifestaron su interés en la posición hasta que voluntariamente abandonaron el trabajo. El entrenamiento fue mínimo: un técnico que había sido entrenado en la recolección de datos de caudal, por uno de los autores (AC o NMA) quien luego entrenó a los agricultores. AC ocasionalmente acompañó al técnico y los agricultores en la recolección de datos y sugirió mejoras en las metodologías.

Se probaron dos métodos diferentes para la estandarización de los lugares de medición. En cinco arroyos, los agricultores simplemente intentaron medir en el mismo lugar. En los otros cinco lugares construimos una plataforma de hormigón (cuencas I, II, IV, V y VIII) para facilitar la medición de la profundidad y la velocidad de corriente.

La construcción tuvo lugar en la estación seca, y se hizo vaciando una plataforma de hormigón de ~2m de largo en el lecho del arroyo, y en el extremo de salida se construyeron dos muros de hormigón de 1 x 0,2 m para constreñir el ancho del arroyo. Estas estructuras no fueron diseñadas para restringir el flujo, sino más bien para estandarizar la recolección de datos al garantizar un flujo constante mediante la provisión de una superficie lisa.

Sin embargo, los caudales en estación húmeda en Santa Rosa son tan poderosos que estas estructuras de hormigón no duraron mucho: cuatro fueron destruidas por el agua en febrero de 2007 y la quinta fue destruida en marzo de 2008.

Las mediciones fueron tomadas entre junio de 2005 y julio de 2008. La mayor parte del año (incluyendo la estación seca de estos años), las mediciones de la profundidad del lecho fueron realizadas dos veces por semana y las mediciones tanto de la profundidad del lecho como de la velocidad de flujo, cuatro veces por mes.

En la estación lluviosa (por ej., en febrero) fue varias veces imposible tomar datos debido al peligroso aumento de la corriente. La medición se realizó cada 50 cm en una línea perpendicular a través del río y en los arroyos donde no se construyeron las estaciones de medición, se retiraron las piedras de gran tamaño el lecho del río antes de realizar las mediciones. Las mediciones de profundidad se hicieron con una regla graduada (precisión: 0,5 cm). La velocidad del agua se midió con el molinete Flow Probe FP101 (Global Water Instrumentation Inc., Gold River, California) (que cuesta ~\$US 750).

La variable que medimos fue en realidad la velocidad promedio, es decir, la velocidad que representa una sección vertical de agua. Hemos seguido la metodología de la US Geological Survey (Te Chow *et al.*, 1988) para ríos poco profundos de menos de 60 cm, estando el punto de medición en el 60% de la profundidad desde la superficie. Este punto presenta la velocidad para toda la sección vertical (Te Chow *et al.*, 1988). Como la mayor parte de los arroyos son poco profundos (generalmente menos de 50 cm), la medición pudo ser tomada fácilmente a través del canal. Cada medición duró por lo general alrededor de 1 min, que es el tiempo necesario para obtener una velocidad estable.

La descarga real Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) en una sección transversal de la zona A (m^2) está dado por:

$$Q = \iint_A v \cdot dA$$

donde v es la velocidad del caudal en m s^{-1} .

Esta integral se puede aproximar por medio de mediciones realizadas en n secciones verticales, siendo la descarga aproximada (Te Chow *et al.*, 1988):

$$Q = \sum_{i=1}^n v_i d_i \Delta w$$

donde v_i es la velocidad media de cada sección (m s^{-1}), d_i es la profundidad del agua de cada sección (m) y Δw es la distancia entre los puntos de medición (m).

Mediante la medición de descargas parciales de cada sección y la subsecuente suma de los mismos, se calculó la descarga total del flujo. Esperábamos cuando se midieron tanto la profundidad como la velocidad permitiría la extrapolación para calcular el flujo total (Q) en los días en los que solamente tomadas las medidas de profundidad.

3.2.3. Relación entre hidrología y cobertura de suelo

Una vez que se obtuvieron los datos de caudal de los ríos y el uso de la tierra para cada sub-cuenca, se utilizó el análisis de regresión para determinar si estas variables estaban relacionadas entre sí. Debido a que el caudal está altamente correlacionado con la zona de la cuenca (coeficiente de correlación de 90%), el análisis de regresión se hizo con la descarga específica (descarga por unidad de área), expresada como profundidad (en mm de agua por mes). A continuación, calculamos el coeficiente de escorrentía (relación de la profundidad de la escorrentía con respecto a la profundidad de precipitación - calculado a partir del análisis de regresión de la lluvia, descrito anteriormente, y que depende en gran medida del uso de la tierra en la cuenca). Teniendo en cuenta que los agricultores locales estaban interesados en maximizar los flujos de agua en la estación seca, probamos la relación entre el % de cobertura bosques nublados y (1) el caudal en l/s/ha en la época seca, y (2) el coeficiente de escorrentía en la época seca (mayo a septiembre).

3.3. Evaluación de los protocolos y su relevancia en el esquema de PSH a nivel local

Después de terminar, cada componente del proyecto fue evaluado en el marco de dos preguntas principales: (1) ¿cómo podrían ser mejorados los protocolos, y (2) ¿cómo ha afectado cada componente del proyecto el desarrollo de un sistema de PSH a nivel local? Para responder estas preguntas entrevistamos a los agricultores participantes y otros habitantes de aguas arriba y aguas abajo.

4. Resultados

Las cuencas que habíamos elegido usando el enfoque “rápido y simple” tenían entre 29 y 647 ha. La Tabla 1 representa los resultados del análisis transformado Box-Cox, donde se observa que las sub-cuencas II-VII, IX y X pueden ser consideradas de la misma población, es decir, eran similares en todas sus variables. En contraste, la cuenca I era grande, con una exposición al este-sureste que le permitió la captura de más nubes de los vientos del norte. La cuenca VIII era pequeña, protegida de los vientos y fue larga y estrecha (con un índice Gravelius alto), con número relativamente reducido de segmentos de canales mayores al de primer orden. Mientras que la cuenca I era diferente de las otras cuencas en tamaño y aspecto, la cuenca VIII difería en tamaño, aspecto, forma y densidad de drenaje: por lo tanto excluimos ambas cuencas de ambos del análisis de hidrología y uso del suelo.

Tabla 1.
Características morfométricas e hidrográficas de la cuenca

Cuenca	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Área (ha)	647 ^b	383	298	126	181	194	143	29 ^b	195	325
Altitud promedio (m)	2105	2121	2047	1955 ^a	2043	2084	2020	2063	2086	2009
Índice de aspecto	0,45 ^b	0,11	0,13	0,09	0,10	0,10	0,10	0,02 ^b	0,11	0,27 ^c
Pendiente promedio (%)	23	25	25	27	28	29	31 ^a	25	27	23
Índice Gravelius	1,67	1,25	1,26	1,52	1,51	1,52	1,47	2,49 ^a	1,39	1,39
Longitud de la cuenca (m)	1760	1856	1687	1285	1621	2184	1519	1439	1813	2198
Densidad de drenaje (km km ²)	2,55	2,58	3,31	2,60	3,18	3,62	3,34	5,01 ^a	2,80	2,65
Relación de bifurcación orden 1	2,4	1,4	3,0 ^a	1,3	2,0	1,7	1,2	1,5	1,6	1,9

^a Valor bruto fuera del 90% del intervalo de confianza.

^b Valor Box-Cox fuera del 90% del intervalo de confianza.

^c Segundo valor Box-Cox redondeado fuera del 90% del intervalo de confianza.

Los datos de precipitación anual medida por los pluviómetros oscilaron entre 1063 y 2294 mm (Tabla 2). La precipitación mensual mostró gran variabilidad entre los años que duro el estudio (como fue señalado por Bruijnzeel, 1990). La única variable significativa en el análisis de regresión fue altitud (lo que explica la variabilidad de las precipitaciones hasta en un 95%). La variable distancia desde la cumbre fue también significativa, pero fue abandonada, ya que era redundante con la variable de altura: el coeficiente de correlación entre estas variables fue -0,79.

En este dinámico sistema hidrológico, la variabilidad tanto natural como artificial es alta: la profundidad se midió en lugares ligeramente diferentes cada vez, y la morfología de las quebradas cambia con frecuencia. De hecho, las inundaciones de la estación lluviosa destruyeron las cinco plataformas de concreto. En arroyos tan dinámicos como los de Santa Rosa, claramente, las plataformas de medición hidrológica no funcionan.

Normalmente no solíamos tomar las medidas de profundidad (d) y velocidad (v) al mismo tiempo: solamente el 28% de las mediciones de caudal se realizaron tanto de la profundidad como de la velocidad de flujo. Los análisis de regresión que trataron de extrapolar datos de caudal (Q) cuando sólo se tomó d no fueron significativas. Encontramos una relación estadística entre d y v solamente en tres de los arroyos. Teniendo en cuenta que no se podía calcular el caudal Q cuando sólo se había recogido datos de profundidad, más del 70% de nuestros datos de caudal de los ríos no pudimos utilizar para hacer las regresiones de flujo/uso de suelo.

Para nuestro análisis de regresión sólo utilizamos los datos de aquellos días cuando recolectamos d y v y calculamos directamente Q (Tabla 3) y no encontramos relación directa entre el caudal de los ríos en la época seca y la cobertura de los bosques nublados (Fig. 2), ni entre el coeficiente de escorrentía de la estación seca y la cobertura de los bosques nublados (Fig. 3).

Tabla 2.
Datos de precipitación anual en el valle de Los Negros.

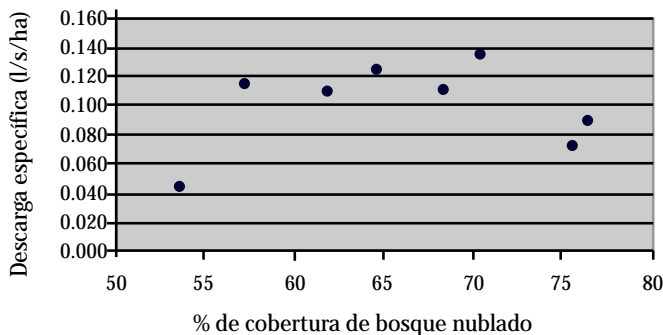
Pluviómetro	X	Y	Altitud (m)	Precipitación anual (mm)
05_01	368,593	8,028,139	1965	1999
05_02	365,489	8,029,161	2064	1803
05_05	368,838	8,029,189	2283	2294
05_06	368,924	8,029,549	2381	1927
05_11	368,107	8,024,045	1590	1120
05_13	363,603	8,025,019	1711	1156
05_14	371,897	8,026,289	1901	1457
05_16	366,016	8,028,299	1649	1063

Tabla 3.

Coeficientes de descarga y escorrentía mensuales en ocho sub-cuencas del Río Los Negros

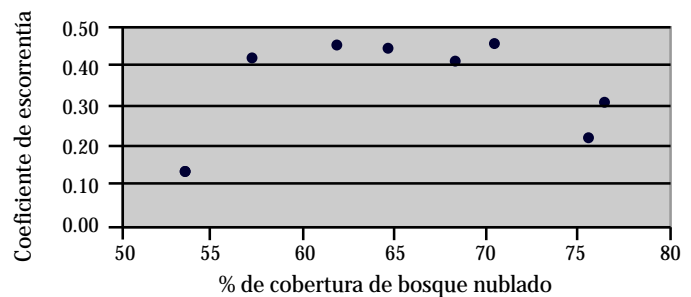
Cuenca	II	III	IV	V	VI	VII	IX	X
% bosque nublado	76	68	54	65	76	62	70	57
Tamaño (ha)	383	298	126	181	194	143	189	325
Prom. mensual coef. escorrentía (l/s/ha)	0.22 (0.41)	0.17 (0.44)	0.09 (0.18)	0.25 (0.53)	0.16 (0.29)	0.22 (0.51)	0.20 (0.44)	0.20 (0.45)
Coef. escorrentía estación seca (l/s/ha)	0.09 (0.32)	0.11 (0.42)	0.05 (0.14)	0.13 (0.45)	0.07 (0.23)	0.11 (0.46)	0.14 (0.46)	0.12 (0.43)
Coef. escorrentía estación lluvia (l/s/ha)	0.32 (0.49)	0.23 (0.45)	0.13 (0.22)	0.35 (0.59)	0.24 (0.36)	0.32 (0.56)	0.26 (0.43)	0.27 (0.47)

Entrevistas con los agricultores confirmaron que el esquema de PSH desarrollado a nivel local está ganando adeptos tanto en la parte alta como en la parte baja de la cuenca. Sin embargo, aguas abajo el acto de comprar parece basarse principalmente en el principio precautorio más que como resultado del monitoreo hidrológico. Los agricultores de aguas abajo están ahora comprometidos en contribuir con el mantenimiento del suministro de agua río arriba. Un aspecto importante para despertar este interés fue la presentación de un análisis de modelación hidrológica (CLAS, 2006) que predice los efectos potencialmente catastróficos del caudal de los ríos y arroyos en la época si continúa la deforestación alrededor de Santa Rosa.

**Fig. 2.** Descarga específica en la estación seca en función a la cobertura de bosque nublado

5. Discusión

Nuestro estudio fue diseñado para responder a tres preguntas: (1) si las cuencas pueden ponerse en pares para su estudio, usando parámetros simples; (2) si se puede desarrollar un sistema de monitoreo hidrológico de bajo costo, y (3) si los datos recolectados se pueden usar para mejorar el funcionamiento de una iniciativa de PSH. Además de responder a estas preguntas, evaluamos nuestros resultados desde la perspectiva de Danielsen *et al.* (2005), quienes identificaron seis factores importantes en los sistemas de monitoreo desarrollados a nivel local: el costo, la sostenibilidad, la capacidad de detectar las tendencias reales, la toma de decisiones y la acción, reglamentación a nivel local, y el seguimiento de las tendencias de mayor escala.

**Fig. 3.** Coeficiente de escorrentía promedio en la estación seca en función a la cobertura de bosque nublado

5.1. ¿Pueden cuencas que son lo suficientemente similares como para llevar a cabo estudios de “cuencas en pares” ser identificadas sólo considerando parámetros simples, tales como el tamaño, aspecto y proximidad?

Cuando se diseñó el estudio, elegimos las cuencas utilizando tres criterios básicos: tamaño, aspecto y proximidad. Esta elección se hizo simplemente visitando los sitios en el campo y no a través de la evaluación de mapas o imágenes de satélite. Este enfoque rápido y sencillo resultó ser suficiente. Llegamos a la conclusión de que para el futuro, de manera similar, los responsables locales podrían elegir las cuencas de estudio para analizar los efectos de la cubierta forestal en el ciclo hidrológico.

5.2. ¿Se puede establecer un sistema de monitoreo de manera local, con menos de \$US 10 000, entrenando pobladores locales para la recolección de datos hidrológicos?

5.2.1. Costo

Para ser sostenible, el monitoreo implementado localmente debe ser barato (Evans y Guariguata, 2008). Hemos alcanzado nuestro objetivo de establecer y hacer funcionar un sistema de monitoreo por menos de \$US 10 000, también identificamos una serie de maneras de cómo poder reducir los costos. En el valle de Los Negros, el único resultado de interés para los interesados en la parte baja de la cuenca es el caudal en la temporada seca.

Acciones futuras de seguimiento podrían ser más eficientes si sólo se centran en esta variable, eliminando al mismo tiempo la necesidad de tratar de realizar las mediciones cuando los niveles de agua son peligrosamente altos. Una ONG, Fundación Natura Bolivia cubrió todos los costos de supervisión asociados con este estudio, pero como el esquema de PSH de Los Negros es cada vez más autosuficiente a nivel local (Asquith *et al.*, 2008), esperamos que los usuarios de aguas abajo puedan cubrir tales gastos.

5.2.2. Sostenibilidad

Para que el sistema de seguimiento a nivel local sea sostenible, la clave es mantenerlo lo más simple posible (Danielsen *et al.*, 2005). Al exigir que los agricultores sólo midan la profundidad del lecho de los arroyos, hemos tratado de evitar darles la tarea de medir la velocidad, que es una tarea más compleja.

Nuestro protocolo, por lo tanto, requirió que los agricultores sólo recogieran los datos de profundidad y que nuestros técnicos mejor formados, personal de la ONG, realicen mediciones periódicas de velocidad y profundidad. Esperábamos que el análisis de regresión de velocidad (v) y profundidad (d) nos permitiera hacer la extrapolación de v y por lo tanto, calcular la descarga (Q) cuando sólo contábamos con el dato d que fue recogido por los agricultores. Además, se construyeron plataformas de concreto para tratar de estandarizar la medición y mejorar así la probabilidad de contar con un análisis de regresión más robusto de d y v , pero esta estrategia fracasó por completo. Las plataformas de concreto fueron destruidas y resultó imposible obtener regresiones significativas, lo que ocasionó que descartáramos más del 70% de nuestros datos. Proponemos que futuros sistemas de monitoreo hidrológico no dependan de la posibilidad de calcular regresiones basadas en mediciones realizadas en otros días. Más bien, los investigadores deben simplificar sus protocolos midiendo cada vez la velocidad y la profundidad (y de ellos calcular directamente la descarga), y lo hacen con ayuda de una piedra plana o una estructura de madera portátil para realizar mediciones de flujo más uniforme.

5.2.3. Habilidad para detectar tendencias reales

Aunque estudios previos han observado una fuerte relación entre la cobertura de bosque nublado y el caudal en temporada seca (Bruijnzeel, 2004), nuestro estudio no lo hizo. Varias explicaciones pueden ser propuestas. La más obvia es que en nuestro sitio de estudio es que los bosques nublados no tienen ningún efecto sobre el caudal (véase Bruijnzeel, 2004).

Esto podría ser debido a que los bosques de Santa Rosa no presentan las marcadas características de los bosques nublados tales como la interceptación horizontal y baja evapotranspiración. Una explicación alternativa podría ser la diferencia entre las cuencas con alto (76% en la cuencas VI) y bajo (54% en la cuenca IV) nivel de cobertura de bosques nublados, lo que no es suficiente para detectar cualquier diferencia en las respuestas hidrológicas (Bruijnzeel, 2004).

Una tercera, y quizás la más probable explicación es que la serie de nuestros datos es demasiado corta -3 años, mientras que los estudios hidrológicos suelen durar décadas- y que hemos cometido una serie de errores durante la recolección de datos.

Mientras que la habilidad de nuestros estudios para detectar tendencias reales es aun desconocida (aun estamos recolectando datos), está claro que podemos mejorar nuestro desempeño. Entre julio de 2005 y junio de 2008, 10 agricultores diferentes hicieron las mediciones, con un promedio de trabajo de 115 días cada uno. Las pruebas de precisión mostraron que en condiciones controladas los resultados de las mediciones son muy comparables entre los agricultores, para un mismo lugar y al mismo tiempo. Se observó un diferencia de solamente 0,8% en los valores de caudal. Sin embargo, la calidad de las mediciones puede ser diferente en condiciones de rutina, ya que los agricultores no siempre buscan el mismo nivel de calidad. Tenemos la sospecha de que en ocasiones, incluso pueden haber inventado los datos. Hemos tratado de minimizar este riesgo, empleando al mismo tiempo dos agricultores, uno de ellos recogió los datos en domingo, mientras que el otro recogió los datos el miércoles: para que haya habido invención de datos a gran escala, se hubiera requerido que haya colusión entre los dos trabajadores. La recolección de metadatos (nombre del técnico, la fecha, hora, y las condiciones del día) ayudó a comprobar la fiabilidad de los datos.

5.3. ¿Pueden esos datos ser utilizados para mejorar el funcionamiento de una iniciativa de PSH?

5.3.1. Toma de decisiones y acción

Un fondo de agua, financiado por la Cooperativa de Agua de Los Negros y el Gobierno Municipal, está ahora invirtiendo en la conservación de la parte alta de la cuenca a través del pago directo por servicios de cuenca. Parece que el monitoreo continuará utilizando los fondos generados localmente. Sin embargo, el esquema de PSH y el fondo del agua se basan en el principio precautorio más que en los datos. Por lo tanto, a primera vista, el sistema de

monitoreo aquí descrito todavía no ha dado los resultados para ayudar en la toma de decisiones a nivel local. Sin embargo, el desarrollo del sistema PSH, el análisis de modelación (CLAS, 2006), y tal vez nuestros datos recolectados, en conjunto catalicen una mayor conciencia local acerca de los posibles vínculos entre el uso del suelo y la hidrología, lo que conduciría a la conservación de más de 3000 hectáreas de bosques aguas arriba (Asquith *et al.*, 2008, véase Becker *et al.*, 2005, para un resultado similar en Ecuador).

Las lecciones que hemos aprendido durante la implementación de nuestros protocolos de prueba probablemente ayudarán a que los usuarios de agua río abajo desarrollen un sistema sostenible de monitoreo hidrológico.

5.3.2. Grupos locales

Sorprendentemente, encontramos que el empleo de miembros de la comunidad local tiene ventajas y desventajas. Esperamos que hubiera una mayor aceptación de la validez de los datos puesto que estos fueron “creado” a nivel local (Danielsen *et al.*, 2005), pero en realidad miembros de la comunidad cuestionaron el trabajo de los empleados locales. Por ejemplo, un propietario sospecha que un técnico le haya robado y no le permitió hacer más mediciones en su propiedad. Sin embargo, como la iniciativa local de PSH se acerca a su punto de inflexión -la mayor parte de la población de Santa Rosa esté pronto dentro del esquema- es de esperar que habrá un aumento concomitante en el interés por mejorar el monitoreo hidrológico.

5.3.3. Seguimiento de las tendencias de mayor envergadura

Fundación Natura Bolivia ha facilitado la creación de una serie de otros fondos de PSA en los municipios vecinos. El protocolo descrito aquí tiene el potencial para ser adaptado y aplicado en estas cuencas. Nuestro enfoque, que se centra en la recogida de datos reales, es una alternativa complementaria al Modelo de Evaluación Hidrológica Rápida del ICRAF que se basa más en percepciones y modelación. Las siguientes mejoras permitirán que nuestro protocolo de recolección de datos sea utilizado de una manera más eficaz y eficiente:

- *Dada la alta variabilidad natural y de medición, el caudal de descarga siempre debe ser calculado directamente.* Esto significa que tanto la profundidad del lecho como la velocidad se deben medir en todo momento. Esto también eliminaría la necesidad de construir estructuras de medición que pueden ser fácilmente destruidos.

- *Sólo los criterios hidrológicos más relevantes a nivel local deben ser monitoreados y no así una serie completa de aspectos de acuerdo al criterio científico* (véase Reed *et al.*, 2008 para una discusión sobre la complementariedad de la utilización de indicadores científicos y de aquellos derivados localmente). Teniendo en cuenta los intereses de los agricultores de aguas abajo de Los Negros, probablemente pudimos haber monitoreado el caudal solamente en la estación seca en lugar de medir el caudal durante todo el año.

- *El sistema de monitoreo a nivel local debe ser institucionalizado para reducir el constante cambio de personal.* La variación de las mediciones se agrava cuando se tiene más de un colector de datos.

EL monitoreo hidrológico debe estar integrado dentro de un contexto que lo haga socialmente aceptable. Sin un sistema de PSH funcionamiento y que ya está ayudando financieramente a los miembros de la comunidad, iniciativas externas que pretendan recoger datos hidrológicos pueden ser vistos con desconfianza y hostilidad. Una vez que se están recibiendo los pagos de compensación, es más fácil para los pobladores locales aceptar que los datos deben ser recolectados. En la mayoría de los casos, no se sabrá si un sistema de PSH tiene sentido desde el punto de vista biofísico sino hasta después de varios años de seguimiento, que permita evaluar si realmente existe o no un servicio hidrológico.

La experiencia de Fundación Natura Bolivia en Los Negros parece ser, por lo tanto, un modelo adecuado: una ONG “se hace cargo” de los PSH los primeros años para generar buena voluntad y proteger los bosques mediante el principio precautorio, mientras se inicia la recopilación de datos y el monitoreo hidrológico, cuyos resultados se los puede utilizar posteriormente para ajustar o cancelar el sistema de PSH.

6. Conclusión

Este proyecto intentó desarrollar un protocolo de recolección de datos para monitoreo por parte de agricultores locales mínimamente capacitados y que proporcione datos hidrológicos útiles y que podrían ser utilizados para calibrar y justificar (o negar) la base del conocimiento para el desarrollo de una iniciativa local de servicios hidrológicos. Nuestro trabajo no se involucró de manera extensiva en debates participativos sobre las percepciones acerca del agua y los bosques (Jeanes *et al.*, 2006), ni en el desarrollo participativo de una serie de indicadores para medir la calidad del agua (Deutsch *et al.*, 2004).

Más bien, tratamos de mantener nuestro protocolo sencillo, breve, y orientado hacia la obtención de datos. Encontramos que se pueden identificar sub-cuencas “suficientemente similares para realizar el análisis”, utilizando criterios simples como tamaño, aspecto y proximidad, sin realizar investigaciones adicionales, lo que sugiere que futuros experimentos pueden escoger los sitios de estudio con la misma rapidez. Además, llegamos a la conclusión de que se puede desarrollar un sistema local de seguimiento hidrológico por <\$US 10 000. A pesar de que nuestros agricultores locales, en su primera incursión, no recolectaron datos de calidad suficientemente alta como para explorar completamente la relación bosque/agua en el valle de Los Negros, parece que la recolección de ese tipo de datos es posible. Con algunas mejoras en la metodología, creemos que sistemas de monitoreo el bajo costo a nivel local tienen el potencial de ser un componente importante de las futuras iniciativas de PSH.

Agradecimientos

Gracias a Fidencio y Adela Ayala por su apoyo en el campo, y a Demetrio Vargas Cardoso, Ana Guerra, Wendy Jorge, Huáscar Azurduy, Paulina Pinto y todos los demás de la Fundación Natura Bolivia por su ayuda con la logística. Gracias a Sergio Melendres, Irwin Borda, Ángel Carrasco, Asterio Ayala, Clever Morón, Juan Luis Peña, Ronny Peralta Morón, Leonardo Flores y Daniel Rocha por la recolección de datos. Gracias a Flavie Cernesson, Gilles Le Moguédec, Daniel Barthélémy y Eric Roose por sus explicaciones sobre hidrometría, estadística, botánica y la simulación de lluvia, y a Raphaël Manlay por su valiosa y meticulosa revisión del manuscrito. Gracias también a Jean-Paul Laclau, Manuel Guariguata, Sven Wunder y tres revisores anónimos por sus acertados comentarios y mejoras en el manuscrito. La investigación fue financiada por el Centro Internacional de Investigación Forestal, el Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional, la Fundación Conservación, Alimento y Salud, El Servicio de Vida Silvestre de EE.UU. y el Centro de Investigación para la Propiedad y el Medio Ambiente (PERC). Los experimentos fueron diseñados mientras Nigel Asquith fue becario de Lone Mountain en PERC, y el documento fue escrito mientras era becario Giorgio Ruffolo en el Programa de Ciencias de la Sostenibilidad en el Centro para el Desarrollo Internacional de la Universidad de Harvard. Se agradece mucho el apoyo de CID y el Ministerio italiano de Tierras, Medio Ambiente y del Mar. Esta es la publicación # 2 del Programa de Ciencias de la Fundación Natura Bolivia.

Referencias Bibliográficas

- Asquith, N.M., Vargas, M.T., Wunder, S., 2008. Selling two environmental services: in-kind payments for bird habitat and watershed protection in Los Negros, Bolivia. *Ecological Economics* 65, 675–684.
- Asquith, N.M., Wunder, S., 2008. Payments for Watershed Services: the Bellagio Conversations. Fundación Natura Bolivia, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- Becker, C.D., Agreda, A., Astudillo, E., Costatino, M., Torres, P., 2005. Community-based monitoring of fog capture and biodiversity at Loma Alta, Ecuador enhance social capital and institutional cooperation. *Biodiversity and Conservation* 14, 2695–2707.
- Bruijnzeel, L.A., 1990. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. Paris, UNESCO Humid Tropics Programme.
- Bruijnzeel, L.A., 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture Ecosystems & Environment* 104, 185–228.
- Bruijnzeel, L.A., Proctor, J., 1995. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? In: Hamilton, L.S., Juvik, J.O., Scatena, F.N. (Eds.), *Tropical Montane Cloud Forests*. Ecological Studies, vol. 110. Springer Verlag, New York, pp. 38–78.
- Carrasco, A., 2008. Comportamiento del régimen hidrológico en función de los bosques nublados y otros usos del suelo en la micro cuenca Santa Rosa de Lima, Santa Cruz. Universidad Autónoma Gabriel René Moreno, Santa Cruz, Bolivia.
- CLAS, 2006. Balance hídrico espacial en las cuencas Los Negros y Quirusillas. CLAS, Cochabamba, Bolivia.
- Cowling, R.M., Egoh, B., Knight, A.T., O’Farrell, P.J., Reyers, B., Rouget, M., Roux, D.J., Welz, A., Wilhelm-Rechman, A., 2008. An operational model for mainstreaming ecosystem services for implementation. *Proceedings of the National Academic of Sciences* 105, 9483–9488.
- Danielsen, F., Burgess, N.D., Balmford, A., 2005. Monitoring matters: examining the potential of locally based approaches. *Biodiversity and Conservation* 14, 2507–2542.

- CLAS, 2006. Balance hídrico espacial en las cuencas Los Negros y Quirusillas. CLAS, Cochabamba, Bolivia.
- Cowling, R.M., Egoh, B., Knight, A.T., O'Farrell, P.J., Reyers, B., Rouget, M., Roux, D.J., Welz, A., Wilhelm-Rechman, A., 2008. An operational model for mainstreaming ecosystem services for implementation. *Proceedings of the National Academic of Sciences* 105, 9483–9488.
- Danielsen, F., Burgess, N.D., Balmford, A., 2005. Monitoring matters: examining the potential of locally based approaches. *Biodiversity and Conservation* 14, 2507–2542.
- Deutsch, W.G., Busby, A.L., Orprecio, J.L., Bago-Labis, J.P., Cequin, E.Y., 2004. Community-based hydrological and water quality assessments in Mindanao, Philippines. In: Bonell, M., Bruijnzeel, L.A (Eds.), *Forests, Water and People in the Humid Tropics*. Cambridge University Press, UNESCO, pp. 134–148.
- Evans, K., Guariguata, M. 2008. Participatory monitoring in tropical forest management: a review of tools, concepts and lessons learned. Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2006. *Global Forest Resources Assessment 2005*, FAO, Rome.
- Jack, B.K., Kousky, C., Sims, K.R.E., 2008. Designing payments for ecosystem services: lessons from previous experiences with incentive-based mechanisms. *Proceedings of the National Academic of Sciences* 105, 9465–9470.
- Jeanes, K., van Noordwijk, M., Joshi, L., Widayati, A., Farida, Leimona, B., 2006. Rapid Hydrological Appraisal in the Context of Environmental Service Rewards. World Agroforestry Centre, Bogor, Indonesia.
- Landell-Mills, N., Porras, I.T., 2002. Silver bullet or fool's gold? A global review of markets for forest environmental services and their impacts on the poor. In: *Instruments for Sustainable Private Forestry Series*, Institute for Environment and Development, London, U.K..
- Le Tellier, V. 2008. Hydrological impacts of tropical cloud forests in Santa Rosa de Lima (Bolivia), in support of a payment for watershed services scheme. Masters Thesis. AgroParisTech-ENGREF, Montpellier, France.
- Moussa, R., 2003. On morphometric properties of basins, scale effects and hydrological response. *Hydrological Processes* 17, 33–58.
- Musy, A., 2003. Cours "Hydrologie générale" [online]. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (ISTE/HYDRAM). Available on the Internet, <<http://echo.epfl.ch/e-drologie/>>.
- NIST/SEMATECH, 2003. e-Handbook of Statistical Methods [online]. Available on the Internet (<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/boxcoxno.htm>).
- Prefecture of Santa Cruz, 2007. Plan municipal de ordenamiento territorial, Pampagrande.
- Reed, M.S., Dougill, A.J., Baker, T.R., 2008. Participatory indicator development: what can ecologists and local communities learn from each other? *Ecological Applications* 18, 1253–1269.
- Robertson, N., Wunder, S., 2005. Fresh tracks in the forest. Assessing incipient payment for environmental services initiatives in Bolivia. CIFOR, Bogor.
- Te Chow, V., Maidment, D.R., Mays, L., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, Columbus, Ohio.
- Wunder, S., 2005. Payments for environmental services: some nuts and bolts. CIFOR Occasional paper, 4.