

**Servicios ambientales para la conservación de los recursos hídricos:
lecciones desde los Andes**

Síntesis Regional CONDESAN 2008

**Producto 1: Estado del conocimiento técnico científico sobre los
servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes**



Rolando Célleri Alvear

Enero 2009

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	1
2. OBJETIVOS DEL PRODUCTO 1	3
3. METODOLOGIA.....	3
4. RESULTADOS	4
4.1. Páramos	5
4.1.1. Estado del conocimiento de la hidrología de páramos naturales	5
4.1.2. Estado del conocimiento de los efectos del cambio de uso de tierras en los servicios hidrológicos.....	6
4.1.3. Relación del SA hidrológico con otros servicios ambientales.....	8
4.2. Bosques andinos	9
4.2.1. Estado del conocimiento de la hidrología de bosques naturales.....	9
4.2.2. Estado del conocimiento de los efectos del cambio de uso de tierras en los servicios hidrológicos.....	10
4.2.3. Relación del SA hidrológico con otros servicios ambientales.....	11
4.3. Agro-ecosistemas y zonas degradadas.....	13
5. INFORMACIÓN Y CONOCIMIENTO CLAVE EN LA RELACIÓN ECOSISTEMA-AGUA PARA APOYAR EL ESTABLECIMIENTO DE UN ESQUEMA EFECTIVO DE COMPENSACIÓN POR SERVICIOS AMBIENTALES.....	14
5.1. Posibilidad de escalar resultados de micro-cuencas de investigación a cuencas más grandes	14
5.2. Posibilidad de extrapolar los resultados de micro-cuencas de investigación a otros sitios.....	15
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	17
7. AGRADECIMIENTOS.....	21
8. REFERENCIAS	21

ANEXO 1: Memorias del Taller de Papallacta, Ecuador. Septiembre 2008

1. INTRODUCCION

En los últimos años se han implementado algunos esquemas o mecanismos financieros para proteger o conservar los servicios ambientales proporcionados por cuencas altoandinas. Algunas de estas experiencias han buscado fomentar prácticas que permitan conservar el agua generada allí y en algunos casos proteger e incluso recuperar las cuencas de captación con la intención de volver a tener la cantidad y calidad de agua que antiguamente se disfrutaba.

Dada la creciente importancia del agua se estima que las iniciativas de implementar esquemas para protección y conservación de cuencas de captación debido a los servicios ambientales hidrológicos (SAH) que prestan crecerán en el futuro inmediato. Por lo tanto es de vital importancia cuantificar el SAH para lograr una aplicación efectiva de estas iniciativas.

Los ecosistemas andinos ofrecen una serie de SAH, los cuales pueden ser priorizados de acuerdo a las necesidades o intereses de las comunidades o los grupos meta. Estos servicios hidrológicos están estrechamente ligados con el régimen hidrológico, es decir, la manera en la cual el agua es liberada de un ecosistema natural. En otras palabras, las propiedades biofísicas de los ecosistemas naturales hacen que el agua que sale de sus cuencas en forma de caudales tenga una variabilidad estacional definida (i.e. régimen hidrológico). De esta variabilidad estacional natural se derivan los denominados servicios hidrológicos de los ecosistemas y pueden incluir:

- Regulación del ciclo hidrológico.
- Altos rendimientos hídricos.
- Mantenimiento de la calidad del agua
 - agua químicamente buena/excelente (e.g. sin contaminantes)
 - agua libre (o con poca carga) de sedimentos
- Recarga de acuíferos.

La regulación del ciclo hidrológico se produce cuando el ecosistema almacena agua en los periodos lluviosos y la libera lentamente en los periodos secos o de estiaje. Es decir, el ecosistema proporciona un balance natural entre caudales de época lluviosa con caudales de época seca. En cuencas sin glaciares, el almacenamiento de agua se produce principalmente (y a veces únicamente) en el suelo. A mayor capacidad de regulación, mayores serán los caudales de verano o caudales base y mayor será el tiempo que el cauce se mantiene con agua antes de llegar a secarse. Así mismo, los caudales de crecida estarán controlados hasta un cierto grado. Por esto se puede decir que al mantener un ecosistema natural todos los servicios hidrológicos están en equilibrio. Es decir, el resto de servicios hidrológicos dependen en gran medida de la capacidad de regulación de un ecosistema.

Sin embargo, estos servicios hidrológicos se pueden ver reducidos al existir una conversión de los ecosistemas naturales a ecosistemas intervenidos por el hombre, en

especial debido a cambios de uso de tierras y otras prácticas, o a prácticas de manejo inadecuadas, tales como:

- Conversión de pajonales a sistemas de producción agrícola o plantaciones forestales
- Deforestación para conversión a pastos (para ganadería intensiva o extensiva), o agricultura
- Quemas

Una vez que se haya producido un cambio de uso de tierras, especialmente al convertir la vegetación nativa a pastos o agricultura, los procesos biofísicos que controlan el régimen hidrológico también cambian y por lo tanto los servicios hidrológicos proporcionados por el ecosistema se degradan. Por ejemplo, al eliminarse la vegetación del bosque la calidad del agua disminuirá debido a la erosión del suelo desprotegido; esto disminuirá la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo lo cual provocará que los caudales base sean menores y duren menos tiempo. Sin embargo es posible recuperar (aunque quizás no en un 100%) los servicios hidrológicos de ecosistemas intervenidos mediante proyectos de restauración o recuperación de cuencas.

En consecuencia, las iniciativas para recuperación de los servicios hidrológicos pueden enfocarse al objetivo más deseado en cada caso específico. En algunos casos se deseará restaurar todos los SAH, pero en muchos casos este objetivo es imposible de lograr en la práctica y se tendrá que optar por rehabilitar solo el servicio hidrológico más importante el cual puede ser: (i) mantener el mayor flujo base posible en la época seca, (ii) disminuir los caudales de crecida, (iii) disminuir la carga de sedimentos en los ríos, entre otros.

Debido a todo esto es muy importante tener claro desde el inicio de la iniciativa de aplicación de un esquema de compensación cuál es el SAH (i) que se puede perder si el ecosistema es alterado, (ii) que fue perdido y/o (iii) que se puede recuperar. Solamente al cuantificar la disminución o alteración del servicio hidrológico se podrá conocer el valor real de conservar los ecosistemas naturales. Igualmente, al conocer la capacidad de recuperación de un sistema alterado negativamente, se podrán identificar o seleccionar esquemas apropiados para conseguir el objetivo deseado con un mayor apoyo de los actores beneficiarios.

Por lo tanto, el propósito del producto 1 de la Síntesis de CONDESAN es determinar el estado actual del conocimiento en el tema de SAH producidos en ecosistemas altoandinos naturales como insumo fundamental para la toma de decisiones en esquemas de compensación por servicios ambientales. Por otro lado, debido a que una gran extensión de los Andes se encuentra ocupada tanto por sistemas de producción agrícola así como por zonas degradadas, este informe recoge información referente a las relaciones entre estas regiones y el agua.

2. OBJETIVOS DEL PRODUCTO 1

El objetivo del presente estudio es realizar una revisión del estado del conocimiento de la hidrología de ecosistemas andinos. En especial se busca determinar que se sabe sobre:

- 1) El ciclo hidrológico en los ecosistemas andinos, esto es sobre (i) la cuantificación del servicio hidrológico y cómo se genera, y (ii) la pérdida de los servicios debido a prácticas humanas.
- 2) Las relaciones entre los servicios ambientales hídricos y otros servicios ambientales como carbono y biodiversidad.
- 3) La información y conocimiento clave para entender la relación uso de la tierra-agua necesario para establecer un esquema efectivo de compensación por servicios ambientales.

3. METODOLOGIA

Para cumplir los objetivos previstos se han identificado 3 mecanismos de obtención de información:

- 1) Asesoría de un grupo de investigadores de hidrología de ecosistemas andinos
- 2) Búsqueda de literatura en revistas internacionales indexadas y tesis doctorales
- 3) Memorias de talleres regionales sobre hidrología de ecosistemas andinos

Si bien existe mucha información adicional que puede estar publicada en otros medios (tesis de grado, publicaciones en revistas nacionales, etc.), la dificultad de su obtención y la posterior dificultad de evaluarla y obtener medidas de verificación hizo que se prefiera la recopilación de estudios en revistas indexadas. Además, los estudios encontrados en otras fuentes, incluida la Internet, presentan una falta de documentación de aspectos importantes como la cobertura vegetal de la cuenca y/o el monitoreo de las cuencas es insuficiente. En la mayoría de los casos se encontró que para cuencas medianas (50 – 300 km²) existe solamente un pluviómetro en la cuenca, con lo cual hay una gran incertidumbre en la estimación de la precipitación espacial y en consecuencia en la estimación de los servicios hidrológicos de estas cuencas. Esta baja densidad de monitoreo se da debido a que las redes hidrometeorológicas nacionales son diseñadas de acuerdo a las normas de la Organización Meteorológica Mundial que recomienda una densidad mínima de un pluviómetro por cada 250 km² para regiones de montaña (WMO, 1994). Por ejemplo, la cuenca del río Paute (5069 km² hasta la presa Amaluza), considerada una de las cuencas mejor instrumentadas del Ecuador, registraba en el periodo 1975-1989 una densidad de un pluviómetro por cada 150 km² (Céleri, 2007), dato que debe ser manejado cuidadosamente ya que mientras pocas de sus sub-cuencas mostraban una densidad mucho más elevada, la gran mayoría no tenían ni un solo equipo dentro de su territorio.

Además se consideró que una publicación en revistas indexadas también recoge información base de otros estudios y por lo tanto se entiende que en la elaboración de estas publicaciones otras fuentes han sido consultadas, revisadas e incluidas.

4. RESULTADOS

Luego de conformar el grupo de asesores, del 7 al 9 de septiembre de 2008 se realizó un taller con la participación de 8 personas investigadoras de la hidrología de ecosistemas andinos que se detallan en la Tabla 1. Los resultados detallados del taller se encuentran en las memorias (Céleri et al., 2008) presentadas en el Anexo 1.

Tabla 1. Asesores del proceso de síntesis

Nombre	Especialidad	Institución
Wouter Buytaert	Páramos, Modelación hidrológica	Universidad de Bristol, Inglaterra
Rolando Céleri	Coordinador del Taller	Universidad de Cuenca, Ecuador
Manuel Contreras	Humedales	Centro de Estudios Ambientales, Chile
Bert De Bièvre	Coordinador PPA	CIP-CONDESAN, PPA
Jorge Molina	Puna y bosques andinos	Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia
Thorsten Pohlert	Modelación hidrológica	Universidad de Mainz, Alemania
Conrado Tobón	Páramos y Bosque andino lluvioso y nublado	Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia
Wolfgang Wilcke	Bosque andino lluvioso y nublado	Universidad de Mainz, Alemania

De este taller y de la revisión de literatura se encontró que los ecosistemas relativamente más investigados son el páramo y los bosques andinos.

Para el resto de ecosistemas (puna, jalca y humedales) no se encontraron referencias en revistas indexadas internacionales sobre estudios relacionados con su ciclo hidrológico y/o de los efectos de cambios de uso de tierras sobre él. Los pocos estudios desarrollados en estos ecosistemas son más bien del tipo descriptivo antes que funcional (ver Anexo 1), es decir se limitan a describir la zona de estudio, pero no investigan el funcionamiento del ecosistema. Por estos motivos, en este informe solamente se recoge la información relacionada con páramos y bosques andinos.

Del análisis de las publicaciones relacionadas con páramos y bosques andinos es evidente que ellas son relativamente recientes y revelan que, si bien han existido estudios sobre biodiversidad y suelos desde hace mucho antes, las iniciativas relacionadas exclusivamente a la hidrología de estos ecosistemas recién se inician a finales de la década de los 90. Por lo tanto se concluye que el desarrollo de investigaciones hidrológicas es reciente y por lo tanto no se descarta que al momento existan iniciativas de investigación de puna, jalca y humedales en camino.

Muchos de los resultados plasmados en este documento se encuentran en publicaciones recientes de revisiones de literatura sobre el conocimiento de la hidrología de los páramos (Buytaert et al., 2006) y los bosques (Bruijnzeel, 2004; Tobon, 2008). A continuación se describen los resultados por ecosistema.

4.1. Páramos

4.1.1. Estado del conocimiento de la hidrología de páramos naturales

De acuerdo a Buytaert et al., (2006), el rendimiento hídrico anual medido en microcuencas de investigación (< 3 km²) en el Sur del Ecuador alcanza el 67%, valor que es idéntico al reportado por Tobón (2008, citando a Arroyave, 2008). Estos valores se explican por la alta capacidad de almacenamiento de los suelos, la baja evapotranspiración (clima frío y húmedo), la morfología de las cuencas y la alta y uniforme precipitación registrada a lo largo del año.

Los suelos del páramo denominados Andosoles tienen una estructura porosa que facilita la infiltración y una extraordinaria capacidad de retener el agua. El contenido de agua en el suelo saturado sobrepasa el 80% (a comparación de suelos minerales de cuencas medias y bajas que registran valores entre 30 y 40%). Por otro lado, la capacidad de infiltración de los suelos así como su conductividad hidráulica saturada presentan valores superiores a las intensidades de lluvia observadas. En sus microcuencas experimentales, Buytaert et al. (2007) observaron intensidades máximas en 15 minutos de un máximo de 39.6 mm/h y este valor se redujo a solo 15.7 mm/h para intervalos de una hora mientras que la conductividad hidráulica saturada alcanza valores sobre los 20 mm/h e incluso superiores (dependiendo del método de medición). Debido a esto, el régimen hidrológico y la generación de caudales están dominados por flujos sub-superficiales y mecanismos de exceso de saturación (es decir, lluvia que cae sobre suelos saturados ubicados cerca de los cauces). En suelos de páramo prácticamente no existe flujo superficial (también denominado Hortoniano).

Aunque no se reportan mediciones, se estima que el consumo de agua del pajonal es bajo, ubicándose entre 0.8 y 1.5 mm/día (Hofstede et al., 1995; Buytaert et al., 2004). De acuerdo a Hofstede (1995) el papel de la vegetación es principalmente el de proteger el suelo.

Sin embargo, en páramos que tienen lluvias permanentes durante todo el año (se tiene registros de sitios donde por cada día sin lluvia hay 3 días lluviosos) es posible que el rol de los suelos en regular el ciclo hidrológico sea mucho menor debido a que el suelo permanece permanentemente saturado y entonces el papel del clima es más importante (Buytaert et al., 2006).

Con respecto a la precipitación uniforme en páramos, Célleri et al. (2007) reportan en su estudio de estacionalidad de las lluvias en la cuenca del río Paute (1840 – 4680 m s.n.m.), que de una escala entre 1 y 7, siendo 1 el régimen pluviométrico menos

estacional con lluvias muy uniformes distribuidas a lo largo del año, las estaciones ubicadas en los páramos se ubican en el segundo puesto de la escala, con una distribución uniforme de la lluvia. Esta característica asociada a las excepcionales propiedades de retención de agua y bajo consumo hídrico, hacen que los páramos se constituyan en verdaderas torres de agua.

4.1.2. Estado del conocimiento de los efectos del cambio de uso de tierras en los servicios hidrológicos

Los principales cambios estudiados en el uso de las tierras estudiados en los páramos andinos son conversiones a plantaciones de pinos, a siembras agrícolas y a ganadería.

Poulenard et al. (2001) estudiaron los efectos de la quema y la labranza en escala de parcela usando un simulador de lluvia. Encontraron un incremento de los coeficientes de escorrentía (volumen de caudal sobre volumen de lluvia) de entre un 10-15% para una cobertura de pajonales a valores de entre 30-50% para el primer evento de lluvia y entre 65-75% para subsecuentes eventos. Mientras las pérdidas del suelo en los sitios con pajonal fueron despreciables (aprox. 100 g al final de los experimentos), para los casos de cambio de uso la erosión aumentó en un rango entre 200 y 1400 g.

Adicionalmente, como consecuencia de las prácticas agrícolas, los suelos permanecen descubiertos de vegetación por algunos periodos de tiempo. Esta exposición directa a la radiación solar produce un secamiento del suelo y la correspondiente pérdida irreversible de retención de agua por hidrofobicidad, la cual puede alcanzar hasta un 40% (Buytaert et al., 2002). Mientras tanto, se ha observado una reducción de la capacidad de retención de agua por labores de labranza de entre 2 y 26%. Al estudiar parcelas cultivadas, Sarmiento (2000, citado por Buytaert et al., 2006) concluye que el balance hídrico esta dominado por la evapotranspiración, llegando a constituir hasta un 66% de las salidas de agua del sistema. Por otro lado, Díaz y Paz (2002) encuentran una reducción en la capacidad de retención de agua desde 100 y 77% (para saturación y punto de marchitez) en paramos naturales hasta 85 y 63%, respectivamente, en cultivos permanentes.

En un estudio mediante el uso de cuencas pareadas, comparando una cuenca inalterada y una cuenca con cultivos de papas y con drenaje artificial, Buytaert et al. (2004) y Buytaert et al. (2005a,b) encontraron que se observa un cambio significativo en el régimen hidrológico con un ligero incremento en flujos pico (promedio de 20%), y una reducción fuerte de los caudales base de hasta un 50%. De esta manera la relación entre caudales pico y base aumentaba de 5.0 para la cuenca inalterada a 12 en la cuenca agrícola. Así mismo, se encontró que la curva de duración de caudales de la micro-cuenca cultivada mostraba una pendiente más pronunciada, indicando una reducción en la capacidad de regulación estimada en un 40%. La explicación radica en que las actividades agrícolas aumentan significativamente la red de drenaje (esto para evitar que el suelo se sature), conectando pequeñas depresiones antes desconectadas y uniéndolas con la red de drenaje principal. Por eso también se

observa un incremento significativo en el tiempo de respuesta de los caudales a eventos de precipitación.

Si bien el rendimiento hídrico (volumen anual de caudal en relación con el volumen anual de lluvia) aparentemente solo sufre una pequeña reducción al convertir pajonal en zona agrícola, el problema fundamental es que la capacidad de regulación de la cuenca se ve severamente afectada. Sin embargo, esto último tiene que ser estudiado con series de tiempo más largas, ya que es muy posible que las condiciones del suelo aun están cambiando (debido a secado, erosión) y es muy posible que en el futuro todos estos indicadores se degraden aun más.

Finalmente, aunque no se realizaron mediciones de producción de sedimentos, la cantidad observada de sedimentos en la micro-cuenca con cultivos es muchísimo mayor, lo cual se reflejó en el número de ocasiones en que el vertedero donde se median los caudales se colmataba y era necesario hacer la limpieza (Iñiguez, comunicación personal). La densidad aparente de los Andosoles es aproximadamente 0.4 g/cm^3 . Esto quiere decir que es más liviano que el agua (1 g/cm^3). Por ello, cuando el suelo se seca y su estructura se rompe (por ejemplo por arado), sus agregados son fácilmente transportados por la escorrentía, lo cual explica las altas tasas de erosión de páramos cultivados, como la presentada anteriormente.

Con relación al impacto de plantaciones de pinos, Farley et al. (2004) en investigaciones realizadas en escala puntual encontraron que los suelos bajo plantaciones de pino registraron cambios en la retención del agua y el carbono orgánico. En su estudio comparativo, los horizontes superior e inferior del suelo bajo plantaciones de pino de 25 años de edad tuvieron respectivamente un 35 y 57% menos carbono orgánico que los suelos con pajonales, mientras que el contenido de humedad del suelo para humedades de saturación, 10, 33 (capacidad de campo) y 1500 kPa (punto de marchitez) de succión se redujo en un 14, 39, 55 y 62%, respectivamente.

PROMAS (2004) y Buytaert et al., 2007 reportan el único caso de observaciones a escala de micro-cuenca. Para ello utilizaron dos micro-cuencas aledañas, una con cobertura natural y otra con plantación de Pino Patula. Se encontró que el rendimiento hídrico anual de la micro-cuenca aforestada es un 50% de aquel observado en la cuenca de pajonales. Así mismo, el cambio en el régimen hidrológico fue total, pero a diferencia del impacto de la agricultura, en este caso se produjo una reducción significativa tanto de caudales pico como de caudales base. Se observó que los caudales base generalmente llegaban a ser un tercio de aquellos registrados en la micro-cuenca de pajonales, aunque el cauce llegó a secarse por completo en ciertas épocas del año. Si bien los caudales pico fueron reducidos durante años normales, en un evento extremo registrado en el año 2007 los caudales específicos pico generados en las dos micro-cuencas fueron de similar magnitud, lo que significa que el posible servicio ambiental de los pinos de atenuar crecidas excepcionales quedó descartado. Esto último es debido a que los suelos de ambas cuencas llegaron a saturarse debido a la lluvia persistente y de elevado volumen y por lo tanto los suelos de las dos micro-cuencas ya no tenían capacidad para almacenar más agua.

En el caso de cambio a ganadería, el principal efecto es un aumento en la densidad aparente del suelo, subiendo ésta de 0.4 g/cm³ en pajonal a 0,62 g/cm³ en pastos (Quichimbo, 2008). Este fenómeno se explica por la compactación que sufre el suelo debido al pisoteo por los animales. Díaz y Paz (2002) también encuentran aumentos en la densidad aparente desde valores entre 0.2-0.31 g/cm³ en páramos naturales a 0.34-0.41 g/cm³ para ganadería extensiva y fuertes aumentos 0.19-0.3 g/cm³ a 0.81-0.86 g/cm³ en ganaderías permanentes intensivas (aunque valores de hasta 0.99 g/cm³ fueron encontrados en ganaderías recientes).

Con respecto a la retención de agua en el suelo y el contenido de agua actual, Quichimbo (2008) también encontró que la conversión de pajonales a pasto produce un efecto negativo mayor al producido por aforestación con pinos. Esta pérdida de retención de agua también se debe al pisoteo ya que la baja resistencia mecánica de los Andosoles es muy baja y su compactación reduce esta capacidad de retener agua. Conclusiones similares son alcanzadas por Díaz y Paz (2002), con una marcada reducción en la capacidad de retención de agua a diferentes presiones en zonas con ganadería permanente, siendo esta reducción menor que en zonas cultivadas. Díaz y Paz (2002) también encuentran una fuerte reducción en la conductividad hidráulica en suelos bajo pastoreo llegando a valores de entre 1.5 y 1.78 cm/h de valores de entre 6.1 y 7.33 cm/h medidos en paramos naturales.

4.1.3. Relación del SA hidrológico con otros servicios ambientales

Como se explicó en la sección 4.1.1 la regulación hidrológica del páramo esta dada por los suelos, entre otros aspectos por sus altos contenidos de materia orgánica. De hecho, los Andosoles se constituyen en un enorme reservorio de carbono orgánico. Buytaert et al. (2006) reporta que en páramos húmedos se pueden tener contenidos de carbono orgánico superiores al 40%. En páramos más jóvenes se encuentran contenidos de entre 2-10% (3.5-10 kg/m²), magnitud similar a la encontrada en páramos más secos (Buytaert et al., 2006).

En el caso de aforestación con pinos, la reducción en la capacidad de retención de agua esta probablemente asociada con la reducción en la cantidad de materia orgánica del suelo (Farley et al., 2004). El hecho que las humedades en saturación sean muy similares entre pajonal y pinos mientras que se produce una reducción significativa en el suelo bajo pinos para el resto de presiones es un indicativo de un cambio en la distribución del tamaño de poros y quizás una reducción de poros finos. La pérdida de materia orgánica del suelo puede ser la causante de este cambio en el suelo (Farley et al., 2004).

Del estudio de Farley et al. (2004) queda en evidencia que las plantaciones de pinos, si bien contribuyen a la acumulación de carbono en los árboles, reducen la cantidad de carbono almacenada en el suelo. La preocupación es que el carbono esta siendo transferido de un reservorio más estable y seguro (el suelo) a otro (plantación) que es susceptible a desaparecer por quemas. Finalmente, cuando la plantación sea cosechada, el efecto neto en el ecosistema será negativo, pues incluso la capa de hojarasca suele ser quemada antes de realizar una nueva plantación. Por otro lado,

una pérdida en el carbono del suelo tendrá un fuerte impacto en la capacidad de regulación (Farley et al., 2004, y descripción de la Sección 4.1.2.). Por lo tanto, existe una estrecha relación entre el servicio hidrológico y el servicio de acumulación de carbono.

4.2. Bosques andinos

Rangel et al. (1997) señalan que los bosques andinos se encuentran ubicados por encima de los 1000 m s.n.m. y hasta el límite inferior de los paramos. Sin embargo no se puede hablar de un solo tipo de bosque, sino que en este rango altitudinal se encuentran 3 tipos de bosques denominados: bosque montano bajo o subandino (1000 – 1800 m), bosque montano alto (1500 – 2500 m) y bosque alto andino o bosques de niebla (> 2000 m) (Tobón 2008 citando a Rada, 2002 y Sentir.org, 2001). Evidentemente los límites de cada tipo de bosque no son fijos y pueden variar dependiendo de las condiciones locales.

4.2.1. Estado del conocimiento de la hidrología de bosques naturales

En su revisión de la literatura, Tobón (2008) señala que existen muy pocos estudios sobre la hidrología de los bosques andinos, la mayoría de ellos centrados en bosques alto-andinos o nublados y montano altos. Sin embargo, existe un consenso que los principales servicios hidrológicos que proporcionan estos ecosistemas son la regulación de caudales y un alto rendimiento hídrico (Tobón, 2008; Anexo 1).

Debido a la presencia permanente de niebla o neblina, los componentes del ciclo hidrológico de bosques nublados son diferentes de aquellos de bosques montano altos. Esta presencia de neblina produce una reducción en la radiación solar y un aumento de la humedad relativa, las cuales en conjunto ocasionan que se produzcan menores pérdidas de agua por evaporación y transpiración. Adicionalmente, el contacto entre la neblina y el bosque hace que se produzca un aporte de agua por interceptación, adicional al de la lluvia y en consecuencia la cantidad de agua que ingresa al sistema hidrológico es superior (Bruijnzeel, 2004).

En sus micro-cuencas de investigación de bosque montano bajo ubicadas entre 1900 y 2200 m, Fleischbein et al. (2006) reportan que de un promedio anual de 2500 m de precipitación (durante el período 1998-2002), las pérdidas por interceptación alcanzan el 40%, mientras que el 60% restante corresponde a la precipitación neta que llega al suelo. Descontando las pérdidas por transpiración, se calcula que el rendimiento hídrico promedio anual es de un 41%. Es decir, un 41% de la precipitación se convierte en escorrentía. En estas micro-cuencas estudiadas la captura de agua de la neblina fue despreciable (Fleischbein et al., 2006).

Por otro lado, en un estudio realizado en Colombia, Tobón y Arroyave (2007, tal como reporta Tobón, 2008) indican un rendimiento hídrico anual del bosque de neblina de un 55%.

Datos de intercepción de lluvia realizados por Holder (2006) muestran que la neblina contribuye con un 7.4% a la precipitación total en la Sierras de las Minas, 2550 m s.n.m., en Guatemala. Sin embargo durante la época seca, la contribución de la captura de neblina puede llegar a ser hasta el 19% de la precipitación.

Finalmente es importante indicar que se reconoce que existen diferencias entre los resultados de investigaciones desarrolladas en diferentes sitios. La razón es que las metodologías de medición de procesos, como por ejemplo captura por neblina, no son estándar y así se estima que hay grandes errores en las mediciones. Por ejemplo, se ha encontrado que mientras un 42% de la humedad del aire es capturada por neblinómetros, se ha encontrado que la vegetación solo puede capturar entre un 12 y 20%. Además existen problemas con otros sensores: descalibración, o no son desarrollados específicamente para bosques nublados.

Sobre la calidad del agua en cuencas de bosques montanos, uno de los estudios más completos es el realizado por Boy et al. (2008) en micro-cuencas de la Estación Científica San Francisco al Sur del Ecuador. Se midieron la concentración de nutrientes en los diferentes flujos de agua dentro del bosque (lluvia, agua que atraviesa el dosel, flujo por el tronco, suelo, solución mineral) y agua en el cauce que sale del bosque. El estudio analiza los efectos de las tormentas en la exportación de nutrientes y los mecanismos hidrológicos que movilizan los principales nutrientes.

4.2.2. Estado del conocimiento de los efectos del cambio de uso de tierras en los servicios hidrológicos

No se conocen publicaciones científicas que estudien los efectos del cambio de bosque a agricultura o pasto mediante cuencas pareadas en los Andes (aunque quizás si hayan pero no están documentados). Solamente en Costa Rica, México, Guatemala y Asia se encuentran estudios con cuencas pareadas, en especial para estudiar conversiones a agricultura y a plantaciones de café (Anexo 1). El único estudio de los Andes utilizando cuencas pareadas se ha desarrollado en la Estación Científica San Francisco (Sur del Ecuador) para determinar los efectos de la tala selectiva en la respuesta hidrológica y de flujos de nutrientes Wilcke et al. (2009)

La remoción total de cobertura vegetal tiene un impacto inmediato en ciertos procesos del ciclo hidrológico y un impacto a largo plazo en otros, en especial debido a que luego de la alteración se necesita de un tiempo determinado hasta que el sistema hidrológico llegue a un punto de equilibrio.

En el estudio realizado por Wilcke et al. (2009) una micro-cuenca de bosque montano (1900-2200 m) fue tratada en un 30% talando un 10.2% de su área basal inicial (los troncos talados permanecieron *in situ*) del área para analizar el impacto en el ciclo hidrológico y el flujo de nutrientes dentro del bosque y fuera de él. Los resultados obtenidos luego de un año de realizada la intervención muestran cambios en el flujo de nutrientes dentro del bosque. Sin embargo los balances a escala de micro-cuenca tanto de nutrientes como de agua fueron similares en las dos cuencas, indicando que la práctica no tuvo un efecto significativo a esa escala y en ese lapso de tiempo.

Un efecto a corto plazo de la remoción de bosques es un aumento en el volumen anual de escurrimiento. Al estudiar los cambios de bosques a pastos, Ataroff y Rada (2000) concluyeron que los pastizales de kikuyo sometidos a pastoreo intensivo disminuirían su intercepción y transpiración y aumentarían el escurrimiento. Así mismo, Tobón (2008, citando a Gentry y Lopez-Parodi, 1980) indique que algunos de estos procesos de deforestación han sido relacionados con el incremento de los caudales en los ríos en Iquitos y sus ríos tributarios del Perú. En general se estima que durante los 2 a 3 primeros años luego de la deforestación es posible observar ganancias en el rendimiento hídrico. Esto se debe a que la conversión de bosque a otro uso de tierra, generalmente menos demandante de agua, hace que exista más agua disponible en el suelo y se produzcan incrementos en el volumen anual de escorrentía. Así mismo, esto podría ocasionar un incremento en los caudales de crecida ya que el suelo se mantendría más húmedo durante más tiempo. Sin embargo, se ha observado que con el tiempo la capacidad de almacenamiento de agua del suelo se reduce significativamente debido a la rápida oxidación de la materia orgánica, compactación de los suelos, erosión, entre otros (Bruijnzeel, 2004, citando a Lal, 1987), ocasionando a mediano y largo plazo una reducción en el rendimiento hídrico. Sin embargo, el servicio más afectado es la regulación hídrica, ya que el suelo pierde su alta capacidad para almacenar agua en periodos húmedos y por lo tanto los caudales base o de verano se reducen drásticamente. Es decir, la deforestación produce a mediano y largo plazo un deterioro de la capacidad reguladora de la cuenca (Bruijnzeel, 2004; Tobon 2008).

De esto se concluye que el rendimiento hídrico no puede ser analizado separadamente de la regulación hídrica, especialmente al considerar que el servicio más importante para la mayoría de los usuarios del agua es la regulación del ciclo hidrológico.

Como resultado preliminar de las mediciones realizadas en micro-cuencas de la Universidad de Cuenca, Feyen (comunicación personal) reporta que si bien el rendimiento hídrico de la micro-cuenca de pasto bajo pastoreo extensivo es superior a la de bosque, sin embargo la regulación es mucho menor en la cuenca de pastos. Efectivamente, mientras aun en épocas muy secas el caudal base del bosque es elevado, el caudal en la cuenca de pasto es prácticamente cero.

4.2.3. Relación del SA hidrológico con otros servicios ambientales

El servicio hidrológico esta ligado con las propiedades biofísicas del bosque, en especial su vegetación, suelos y clima. Debido a esto existe una relación muy estrecha entre biodiversidad y la provisión del servicio agua: si el bosque se mantiene inalterado, se tiene una biodiversidad muy rica y sus servicios hidrológicos se generan al 100%.

Alteraciones climáticas y destrucción del bosque afectan tanto a la biodiversidad como al servicio hidrológico. Esto ha podido ser demostrado en pocos casos. En su estudio de la composición y tamaño de poblaciones de ranas y lagartijas en Centro América,

Pounds et al. (1999) reporta una reducción dramática en el número de las especies en años con una reducida incidencia de la neblina (debido a altas temperaturas de la superficie del Océano Pacífico), lo cual adicionalmente produjo un incremento en la radiación solar incidente y en consecuencia en la evapotranspiración. En consecuencia, se estima que la reducción en el ingreso de agua al sistema en conjunto con el incremento en la evapotranspiración ocasionó una reducción en el rendimiento hídrico del bosque.

Por otro lado, una remoción completa del bosque no solo afecta el ciclo hidrológico como fue discutido en la sección 4.2.2., sino que también causa una destrucción completa de la biodiversidad nativa. Además, en este caso todo el sistema hidrológico aguas abajo es afectado, lo cual incide en la vida acuática. De hecho, la respuesta hidrológica del ecosistema proporciona las condiciones para que se desarrolle vida acuática en los ríos o cauces. Si el hidrograma de respuesta del ecosistema cambia debido a la remoción del bosque (por ejemplo con un aumento en caudales pico y reducción de flujos base), diferentes formas de vida acuática del sistema fluvial, o que dependen de él, serán afectadas. La remoción del bosque además reduce la capacidad de capturar carbono atmosférico y fijarlo tanto en la biomasa como en la capa de hojarasca y el suelo (Letts, 2003).

Otro asunto importante es que la pérdida de bosques por deforestación trae consigo una pérdida de las reservas de carbono almacenadas en su biomasa. Un ejemplo de mediciones de biomasa total sobre el nivel del suelo en bosques secundarios andinos es el estudio realizado por Fehse et al. (2002). En sus análisis encontraron cantidades de 241 Mg ha^{-1} (para un bosque de *Alnus acuminata* de 45 años ubicado a 3200 m) y 366 Mg ha^{-1} (para un bosque de *Polylepis incana* or maduro de edad desconocida ubicado a 3600 m), cantidades comparables a aquellas de bosques tropicales de zonas bajas. La productividad medida como acumulación de biomasa sobre el suelo fue alta en ambos bosques en su fase de establecimiento (14.2 y $15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, a 8 y 6 años respectivamente) y se redujo en bosques de 30 años (5.9 y $6.9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (Fehse et al., 2002). En otro estudio realizado en bosques secundarios de Costa Rica, Cifuentes (2008) encuentra 298 Mg ha^{-1} de biomasa total en un bosque húmedo de 60 años. Por otro lado, Nadkarni et al. (2004) reportan un estudio para bosques primarios montanos nublados de Costa Rica encontrando valores de 523.2 Mg ha^{-1} de biomasa total sobre el suelo. Otros estudios de biomasa, carbono y/o nutrientes en bosques montanos son los realizados por Wilcke et al. (2002, 2005), Roderstein et al. (2005) y Leuschner et al. (2007).

Así mismo, aparentemente existe una relación entre precipitación y la biodiversidad del bosque. Si bien la variabilidad espacial del agua que atraviesa el dosel del bosque es muy grande y depende de su estructura (Fleischbein et al., 2005), su magnitud es bastante estable en el tiempo. Por lo tanto es probable que esta variabilidad persistente ayude a la creación de nichos ecológicos dentro del bosque (Zimmermann et al., 2007; Wilcke, comunicación personal).

4.3. Agro-ecosistemas y zonas degradadas

Una gran parte de los Andes bajo 3000 m s.n.m. se encuentran bajo sistemas de producción agrícola bien establecidos y probablemente la mayoría de estos sistemas de producción no tienen medidas de conservación de suelos y agua. La adopción de medidas de conservación traerá beneficios directos a los agricultores y también puede traer beneficios hidrológicos a zonas bajas.

En la búsqueda de literatura no se encontraron estudios que evalúen directamente los impactos de la aplicación de técnicas de conservación de suelos en la hidrología en escalas de interés (cuenca hidrográfica). Sin embargo, existen varias experiencias a escala de parcela que permiten inferir que se tendrán resultados positivos a escala de micro-cuenca o mayor, tanto en el control de sedimentos como en la reducción de escurrimiento superficial.

Sin la finalidad de llegar a establecer el estado del conocimiento sobre los efectos de prácticas de conservación en la hidrología se presentan a continuación 2 ejemplos de las ventajas de implementarlas. Thierfeldera et al. (2005) encontraron que tratamientos para conservación de suelos, como labranza mínima y rotación de cultivos, mejoraron el estado físico del suelo y previnieron la formación de costras. Consecuentemente, las propiedades hidrológicas del suelo mejoraron también, evitando el escurrimiento superficial (y por ende la erosión) debido a la reducción de infiltración ocasionada por las costras. Por otro lado, Dercon et al. (2003) estudió los efectos de implementar terrazas de formación lenta en los suelos. Los resultados indican una reducción en la erosión a nivel de parcela pero también una variabilidad espacial en la producción con una mayor productividad en la zona baja de la terraza. Esto último se explica debido a los suelos poco profundos del área estudiada, lo cual hace que las partes altas de las terrazas queden desprovistas de buen suelo a medida que la terraza se forma. Adicionalmente los resultados sugieren un aumento en la retención de humedad del suelo en las terrazas. En conclusión, estas medidas de conservación de suelos están mejorando la retención de humedad y otras variables importantes para la hidrología, por lo que su implementación es positiva para el mejoramiento de los servicios hidrológicos proporcionados por estas cuencas.

Dercon et al. (2006) estudió los efectos del sistemas de cultivos en fajas siguiendo las curvas de nivel.

A pesar de que estos resultados son positivos en escala de parcela, se desconoce cual será el efecto a escalas más grandes. El impacto depende del porcentaje de la cuenca que se encuentra bajo sistemas de agricultura de conservación. También dependen del estado inicial previo a la implementación de las prácticas, del tipo de suelos, características del clima y precipitación. Al analizar los efectos de la labranza sobre las propiedades hidrofísicas de los suelos Strudleya et al. (2008) encontraron que dependen de la ubicación espacial entre surcos, dentro de las parcelas dependen de la posición en el paisaje y entre parcelas dependen del clima y del tipo de suelos. Por lo tanto, si bien dentro de la parcela los resultados positivos son evidentes, a escalas de micro-cuenca o mayor es muy complicado poder estimar los impactos en la hidrología local.

Sin embargo es importante considerar los resultados de investigaciones en múltiples escalas (desde parcelas hasta cuencas hidrográficas) los cuales indican que solamente una pequeña fracción de los sedimentos que entran en los ríos se derivan de áreas cultivadas (Vanacker et al., 2003). La mayoría de los sedimentos son producidos en zonas no aradas ya sea por caminos vecinales o por procesos tales como grandes movimientos en masa, erosión en cárcavas, erosión de márgenes e incisión de cauces fluviales. Si no se consideran estos procesos, se puede llegar a conclusiones erróneas sobre grandes tasas de producción de sedimentos atribuidas a los agricultores. Por ejemplo, mediciones realizadas en diferentes escalas espaciales por Romero (2005), desde parcela hasta micro-cuenca (~ 50 ha) y De Bièvre et al. (2006) en micro-cuencas (~1-10 km²) y sub-cuencas (~60 km²) determinan que hay poca erosión en sitios agrícolas y que la gran mayoría del sedimento proviene de zonas degradadas. Esto también parece coincidir con resultados de otras investigaciones de las relaciones pobreza-degradación ambiental. En su estudio de tipologías de hogares de agricultores en un sector de Colombia, Agudelo et al. (2003) encontraron que la pobreza no estaba directamente correlacionada con la degradación ambiental y que la degradación estaba en función de las actividades productivas de los agricultores. En forma similar, Ravnborg (2003) encontró que los agricultores no pobres eran los agentes inmediatos de degradación ambiental en una zona de montaña en Nicaragua.

Estudios en zonas degradadas ubicadas en zonas bajas de las cuencas (2000 – 2600 m s.n.m.) han revelado que su recuperación o rehabilitación (mediante reforestación apoyada por obras físicas) no solamente reduce la cantidad de sedimentos producidos allí (Molina, 2008), sino que efectivamente se puede llegar a conseguir tasas de erosión cercanas a aquellas originales cuando la vegetación restaurada es densa (Vanacker, 2007). En este sentido, en estas áreas donde sus condiciones están muy deterioradas, (casi) no hay suelo, y es muy difícil que se puedan establecer especies nativas en la reforestación, el uso de especies no nativas como eucalipto y pino ha proporcionado buenos resultados. De esta manera se concluye que no se puede generalizar que una especie exótica es siempre “mala”, sino que su utilización debe estar a la par con el sitio donde se la quiere utilizar.

5. INFORMACIÓN Y CONOCIMIENTO CLAVE EN LA RELACIÓN ECOSISTEMA-AGUA PARA APOYAR EL ESTABLECIMIENTO DE UN ESQUEMA EFECTIVO DE COMPENSACIÓN POR SERVICIOS AMBIENTALES

5.1. Posibilidad de escalar resultados de micro-cuencas de investigación a cuencas más grandes

Actualmente, el escalamiento es uno de los temas más importantes de las investigaciones hidrológicas mundiales. Por ello, el escalamiento no es cuestión de

multiplicar el caudal específico encontrado en la cuenca de investigación por el área de la cuenca de interés, sino que depende de muchos otros aspectos.

Para los Andes, en principio, se establece que si en la nueva escala de interés la cobertura vegetal es la misma (por ejemplo, al menos existe el mismo porcentaje de bosque con las mismas características) y el clima es similar, el escalamiento sería posible (ver Anexo 1). Sin embargo, si en la nueva escala se introducen nuevos usos de tierra donde el porcentaje de los bosques o pajonal se reduce significativamente en comparación con la cuenca de investigación, las propiedades hidrológicas del bosque o pajonal se vendrán a diluir. Por ejemplo, la atenuación de crecidas regulares ya no será evidente y en el caso de flujos base, es muy posible que al final de la época seca todo el flujo base a la salida de la cuenca grande provenga únicamente del bosque o páramo. Igualmente si el clima cambia significativamente debido a las fuertes gradientes en precipitación, insolación, temperatura, etc., la precisión del escalamiento también se verá reducida (Céleri et al., 2009).

En conclusión, hace falta más investigación para tener una mejor predicción de los efectos que se producen al escalar. Para ello es necesario contar con cuencas equipadas con equipos de monitoreo en diferentes escalas espaciales (denominadas cuencas anidadas) y con un mayor número de sitios de monitoreo a lo largo de los Andes.

5.2. Posibilidad de extrapolar los resultados de micro-cuencas de investigación a otros sitios

Dadas las circunstancias, la extrapolación de resultados a otros sitios es aun muy subjetiva. Si se basa únicamente en la proporción de la cuenca con área de bosques o páramos y si los suelos son similares, entonces es posible tener ciertos resultados cuantitativos. (ver Anexo 1)

Sin embargo, resultados cuantitativos con precisión aceptable para una iniciativa de conservación de servicios ambientales (en las cuales los recursos hídricos que se protegerán, o lo que se evitará perder, deben ser claramente identificados y socializados con el público que financia la iniciativa), serán muy difíciles de lograr (Ver Anexo 1). Por ejemplo, para el caso de bosques, las pérdidas de agua por interceptación dependen mucho del dosel y pueden variar en un rango muy amplio. Por lo tanto para poder extrapolar los resultados, las características del dosel deben ser similares a las del sitio investigado.

En este sentido los efectos del cambio de cobertura de un ecosistema natural a uno intervenido (por ejemplo de pajonal a pinos o bosque a pastos) serán muy similares a los reportados en este estudio. Lo que va a variar es la magnitud del efecto, lo cual se debe a las condiciones particulares del sitio de interés: sus suelos (profundidad, capacidad de retención de agua, contenido de materia orgánica), clima (magnitud y variabilidad de la precipitación) y en el caso de bosques del dosel.

5.3. Información y conocimiento clave en la relación ecosistema-agua necesario para establecer un esquema efectivo de pago o compensación por servicios ambientales

El éxito en la extrapolación de resultados a las cuencas de interés dependerá mucho de contar con un sitio de investigación donde las características sean muy similares a las del sitio de interés. Y aquí es donde radica uno de los puntos débiles del proceso ya que en la actualidad los sitios de investigación aun son muy pocos y por lo tanto se desconoce si los resultados obtenidos en ellos pueden ser generalizables en los Andes. Evidentemente, lo más probable es que el mismo efecto observado en estos sitios de investigación ocurra en los sitios de interés, pero aquí la pregunta clave es la magnitud del efecto, la cual depende de particularidades y diferencias en clima y otros factores adicionales.

Sin embargo, para establecer los servicios hidrológicos de una cuenca es necesario conocer al menos algunos detalles de su hidrología y de sus aspectos biofísicos. A continuación se muestra una secuencia de información necesaria para la realización de estimaciones, dependiendo del grado de precisión deseado (ver Anexo 1 para más información).

1. En primera instancia, los datos mínimos necesarios son precipitaciones y caudales de la cuenca. El número de sensores necesarios para medir lluvia y caudal depende de las dimensiones de la cuenca, de la variabilidad espacial de la precipitación y del número de ecosistemas presentes aguas arriba del sitio de captación del agua. Los sensores actuales pueden ser programados fácilmente para registrar datos a cualquier intervalo de tiempo (horarios, 30 minutos, 10 minutos, etc.) y dependiendo de la capacidad de su memoria se puede realizar visitas para descargar datos una vez por mes o incluso en intervalos más espaciados (aunque no es deseable por asuntos de mantenimiento de los sensores).

En los Andes no es raro encontrar grandes diferencias en precipitación en cortas distancias (Buytaert et al., 2006; Célleri et al., 2007). Una sub- o sobre-estimación de la precipitación puede llevar a estimaciones muy equivocadas del rendimiento anual.

Por otro lado, tener observaciones de caudal solo en el sitio de captación puede llevar a conclusiones incorrectas sobre la hidrología de la cuenca y sus recursos hídricos, si aguas arriba existen varios ecosistemas (páramos, bosques, zonas degradadas) que presentan características hidrológicas distintas.

Por lo tanto, tener información de la cuenca de interés, en escalas hidrológicamente significativas y de todos los ecosistemas presentes, es de vital importancia.

2. En el caso de cuencas con bosques también será necesario conocer el tipo de bosque y la estructura del dosel. Esto puede afectar fuertemente la cantidad de agua que se pierde del sistema por interceptación y evapotranspiración y por ende, determinar la cantidad de agua disponible y su variabilidad.

3. Si se desea mejorar la predicción se deberá contar con datos meteorológicos locales.
4. Finalmente, en el caso ideal se debería contar además con datos de la morfología de la cuenca y estudios de suelos (tipos de suelos, profundidad de suelos, propiedades de retención de agua, cantidad de materia orgánica, entre otros).

De este análisis se formulan las siguientes preguntas:

- ¿Existe la disposición a invertir en un sistema de monitoreo (mínimo) que proporcione información hidrológica básica de la cuenca de interés?
- Si el propósito es establecer iniciativas de conservación de los recursos hídricos, ¿por qué no iniciar conociendo cuantitativamente el estado del servicio ambiental de interés?

Definitivamente la calidad y densidad del sistema de monitoreo dependerá de varios factores, como por ejemplo el número de personas que están beneficiándose del servicio ambiental hidrológico. Así, las cuencas que abastecen de agua potable a ciudades grandes necesitarán un monitoreo más detallado (más sitios de observación de lluvia, escorrentía y meteorología) que una cuenca que abastece a una pequeña población donde quizás un monitoreo mínimo (lluvia y escorrentía) será suficiente. Evidentemente, las dimensiones de las cuencas también se relacionan con el caudal captado, por lo que poblaciones pequeñas probablemente solamente captan agua de una pequeña cuenca con una sola cobertura vegetal, por lo que el concepto de monitoreo mínimo sería en este caso una estación de caudales y un par de medidores de lluvia.

Además, se debe considerar que las mediciones realizadas por estos equipos de monitoreo también pueden ayudar a verificar los efectos de la aplicación de los proyectos de conservación, protección o recuperación/rehabilitación. Sin embargo, para el caso de recuperación de servicios hidrológicos, por ejemplo mediante proyectos de reforestación, es muy importante notar que el efecto positivo podrá verse solamente luego de varios años de implementado el proyecto. Así mismo, la magnitud del cambio dependerá del porcentaje de la cuenca que ha sido reforestada. En general se considera que cambios en un área inferior al 20% del total de la cuenca producen efectos que son muy difíciles de distinguir en las observaciones hidrológicas (especialmente a corto plazo), quedando ocultos debido a variaciones del clima y errores en la medición de las variables hidrológicas (precipitación espacial y caudales). Desde el punto de vista hidrológico resulta incomprensible que la mayoría de las cuencas de captación de agua potable de las ciudades andinas no estén equipadas con una buena red de sensores de monitoreo hidrometeorológico.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio tuvo por objetivo realizar una revisión del estado del conocimiento de la hidrología de ecosistemas andinos. En especial se deseaba determinar lo que se sabe sobre:

- 1) El ciclo hidrológico en los ecosistemas andinos, entender cuál es el servicio hidrológico, cómo se genera y cómo es afectado por cambios en el ecosistema.
- 2) Las relaciones entre los servicios ambientales hídricos y otros servicios ambientales como carbono y biodiversidad.
- 3) La información y conocimiento clave para entender la relación uso de la tierra-agua necesario para establecer un esquema efectivo de compensación por servicios ambientales.

6.1. Conclusiones

- De la revisión de literatura y de las consultas realizadas a investigadores de la hidrología de los Andes, se encontró que aun existe muy poco conocimiento sobre la mayoría de los temas en cuestión como para llegar a establecer conclusiones definitivas. Si bien al momento existen varias iniciativas de investigación como por ejemplo aquellas de la Estación Científica San Francisco (Sur del Ecuador), Universidad de Cuenca (Ecuador), Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y del proyecto regional andino sobre caudales ecológicos (CAUDECO) que están generando un conocimiento muy importante en paramos y bosques andinos, aun quedan muchos vacíos de conocimiento.
- Para el caso de los ecosistemas puna y jalca no se han encontrado investigaciones que puedan apoyar la determinación de SA hidrológicos en forma certera y cuantitativa. No se encuentra ninguna referencia en revistas indexadas sobre la hidrología de estos ecosistemas. Sin embargo López (1998) argumenta que florísticamente las praderas (los Yungas) de la vertiente oriental de Bolivia se parecen más al páramo que a la puna húmeda emplazada en el altiplano, lo cual es un indicio de que sus cualidades hidrológicas serían comparables también.
- Las investigaciones realizadas se han desarrollado mayoritariamente en escalas de parcela y micro-cuenca. La falta de observaciones (asociada a la dificultad del monitoreo) en escalas mayores limita la generalización y escalamiento de resultados.
- Si bien los ecosistemas naturales propician una alta tasa de infiltración, lo cual es beneficioso para la recarga de acuíferos, ésta mas bien depende de características geológicas apropiadas. Por lo tanto es muy difícil generalizar conclusiones sobre el rol de estos ecosistemas en la recarga de acuíferos.
- El rendimiento hídrico de los paramos y bosques depende mucho de la magnitud y variabilidad de la precipitación recibida. En páramos húmedos (1200 mm de precipitación promedio anual) se reportan rendimientos a escala de micro-cuenca de un 67%. No se encuentran reportes de paramos muy húmedos ni secos. En bosques nublados y montanos el rendimiento hídrico anual se encuentra entre el 41 y 55%.
- Los cambios en el uso de tierras tanto de páramos como de bosques, tiene efectos muy negativos en el ciclo hidrológico, en especial en la regulación de los caudales.

- La regulación del ciclo hidrológico es el servicio ambiental más importante de los ecosistemas andinos. Si bien la vegetación juega un papel muy importante en el ciclo hidrológico, el suelo es el principal componente que proporciona este servicio.
- Es necesario entender los procesos hidrológicos (importancia de la cobertura vegetal en la interceptación, infiltración y movimiento de agua en los suelos, mecanismos de generación de escorrentía, entre otros) que generan el servicio ambiental hidrológico para poder valorar los servicios. Por ello, es necesario emprender nuevas iniciativas de investigación en el tema que no solo se enfoquen en medir lluvia y escorrentía, sino que también estudien los procesos hidrológicos.
- La erosión producida en parcelas de campesinos es mucho menor que otras formas de erosión. A escala de cuenca los mayores productores de sedimentos son las zonas degradadas y los grandes movimientos de masa. La producción de sedimentos está concentrada en el espacio (focos de producción) y tiempo (eventos de corta duración). Por lo tanto se concluye que ecuaciones como la USLE no se desempeñarían bien debido a estas características.
- La recuperación de los servicios hidrológicos depende en gran medida del grado de degradación alcanzado y del ecosistema original. Degradación de zonas bajas puede recuperarse parcialmente reconstruyendo (en caso de ser posible) la vegetación original. Sin embargo la degradación de los suelos de páramos es considerada irreversible.

Entre los vacíos de conocimiento más relevantes se pueden mencionar:

- Aun no se puede establecer conclusiones definitivas sobre la capacidad de regulación de cada ecosistema. Existe mucha variabilidad en las propiedades biofísicas de los ecosistemas y en el clima a lo largo de los Andes, lo cual crea una multitud de posibilidades con respecto al funcionamiento hidrológico. Por lo tanto la cuantificación de los servicios hidrológicos y la determinación de los mecanismos que los generan, aun son necesarios y tienen la más alta prioridad de investigación.
- La precipitación es altamente variable en el espacio. Por lo tanto es necesario mejorar nuestro conocimiento sobre cuánto llueve en las cuencas andinas. Por ejemplo, una subestimación de la precipitación puede dar la idea de que el rendimiento hídrico anual (relación entre caudal anual y precipitación anual) en una cuenca es sobresaliente, cuando en realidad no es tan alto.
- En algunos páramos y bosques se observa una precipitación relativamente uniforme a lo largo del año, con muy poca variabilidad. Entonces la pregunta que surge es ¿Cuánto del servicio hidrológico depende de la precipitación uniforme a lo largo del año y cuánto depende de las propiedades hidrológicas de los ecosistemas? ¿Qué porcentaje del caudal que sale de la cuenca se debe a las propiedades de “esponja” de los suelos y qué porcentaje se debe a la precipitación continua? Esto es de principal importancia en zonas que tienen una época seca marcada, donde el efecto esponja es más importante que en zonas que no tienen épocas secas.

- Si bien aun existen vastas áreas cubiertas de ecosistemas inalterados o bien conservados, la mayoría de los Andes ya ha sido ocupado por actividades humanas. En este sentido, las preguntas más frecuentes recibidas de organismos de desarrollo son ¿cómo recuperar los SA hidrológicos perdidos al implementar agro-ecosistemas?, y ¿cuánto del servicio hidrológico se podría recuperar mediante la aplicación de mejores prácticas de manejo del suelo?, las cuales sin duda son grandes vacíos de conocimiento.
- Las variables climáticas que están produciendo el retroceso observado en los glaciares también están afectando en mayor o menor grado al resto de ecosistemas andinos. Es importante incluir el componente de cambio climático en las investigaciones que se desarrollen en el futuro.

6.2. Recomendaciones

- Debido a que la calidad de las estimaciones de los servicios hidrológicos depende del grado de información disponible, es muy importante empezar a generar datos en los sitios de interés. Los datos tal y como se encuentran en las instituciones nacionales encargadas del monitoreo hidrometeorológico son insuficientes para estos propósitos. Sin embargo, en algunos casos es posible ampliar el conocimiento del funcionamiento hidrológico de los ecosistemas mejorando la densidad de la red de monitoreo nacional.
- Aun es poco el interés en extrapolar resultados a otras áreas pero en poco tiempo será mucho mayor. Por lo tanto es imprescindible invertir en proyectos de investigación que monitoreen más sitios distribuidos a lo largo de los Andes y que produzcan resultados focalizados en corto y mediano plazo (0.5 a 3 años).
- Los servicios proporcionados por cada tipo de bosque (nublado, lluvioso, montano, etc.) son de magnitud diferente. Debido a ello es necesario estudiar más sitios para poder establecer conclusiones sólidas. En los estudios y análisis deberá estar muy clara la diferencia entre bosques sin o con neblina.
- Es necesario tener protocolos estandarizados para el control de la calidad de datos y su procesamiento.
- Hay la necesidad de identificar índices apropiados para poder comparar los resultados de estudios sobre SA hidrológicos entre diferentes sitios de monitoreo o investigación.
- Es muy importante determinar y/o desarrollar modelos hidrológicos apropiados para la región con el fin de utilizarlos en estudios de análisis de escenarios (predicción).
- Es importante conocer las posibilidades de recuperación de los SAH por medio de la implementación de mejores prácticas de manejo en sistemas productivos (agro-ecosistemas) a escalas de interés.

7. AGRADECIMIENTOS

Muchas ideas y material de este informe fueron generados en el taller realizado en Papallacta en Septiembre de 2008. A los participantes del taller: Wouter Buytaert, Manuel Contreras, Bert De Bièvre, Jorge Molina, Thorsten Pohlert, Conrado Tobón y Wolfgang Wilcke se les agradece por su invaluable contribución.

Los comentarios de Augusto Castro, Andrea Garzón, Fabián Navarrete, Miguel Saravia, Marcela Quintero y Roberto Quiroz, participantes de un taller de discusión de la síntesis CONDESAN, permitieron identificar enlaces y sinergias entre los resultados de este informe y el resto de productos de la síntesis.

Los comentarios y sugerencias de Bert De Bièvre y Marcela Quintero a una versión preliminar de este documento son particularmente reconocidos.

8. REFERENCIAS

- Agudelo C, Rivera B, Tapasco J, Estrada R. 2003. Designing Policies to Reduce Rural Poverty and Environmental Degradation in a Hillside Zone of the Colombian Andes. *World Development*, 31, 1921-1931.
- Ataroff, M., Rada, F., 2000. Deforestation impact on water dynamics in a Venezuelan Andean cloud forest. *Ambio* 29, 440–444.
- Boy J, Valarezo C, Wilcke W. 2008. Water flow paths in soil control element exports in an Andean tropical montane forest. *European Journal of Soil Science*, 2008, 1209–1227.
- Bruijnzeel LA. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture Ecosystems & Environment* 104, 185-228.
- Buytaert, W., Deckers, J., Dercon, G., De Bièvre, B., Poesen, J., Govers, G., 2002. Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. *Soil Use and Management* 18, 94–100.
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G., Deckers, J., 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.
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G., Deckers, J., 2005a. The effect of land use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes* 19, 3985–3997.

- Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., Deckers, J., 2005b. Analysis of the water balance of small páramo catchments in south Ecuador. Proceedings of the International Conference on Headwater Control VI: Hydrology, Ecology and Water Resources in Headwaters. Bergen, Norway, 20–23 June 2005, CDROM.
- Buytaert W., R Celleri, B De Bievre, R Hofstede, F Cisneros, G Wyseure, J Deckers. 2006. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth Science Reviews* 79, 53-72.
- Céleri R, Willems P, Buytaert W, Feyen J. 2007. Space-time rainfall variability in the Paute Basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes* 21: 3316 – 3327
- Céleri R, Buytaert W, Contreras M, De Bièvre B, Molina J, Pohlert T, Tobón C, Wilcke W. 2008. Memorias del taller de expertos en hidrología de ecosistemas andinos. Papallacta, Ecuador.
- Céleri R, Willems P, Feyen J. 2009. Impact of scarce rainfall data on the hydrological modelling of tropical Andean basins. Proceedings of the International congress on Hydroinformatics. CD-ROM.
- Cifuentes M. 2008. Aboveground biomass and ecosystem carbon pools in tropical secondary forests growing in six life zones of Costa Rica. Tesis de grado. Oregon State University. Estados Unidos.
- De Bievre B, Pacheco E, Cisneros F, Mora D. 2005. Actualización del Conocimiento sobre la producción de sedimentos a diversas escalas en la cuenca hidrográfica del río Paute. Presentación en el Seminario Recursos hídricos en el Austro Ecuatoriano.
- Dercon G, Deckers J, Govers G, Poesen J, Sánchez H, Vanegas R, Ramírez M, Loaiza G. 2003. Spatial variability in soil properties on slow-forming terraces in the Andes region of Ecuador. *Soil and Tillage Research*, 72, 31-41.
- Díaz E, Paz L. 2002. Evaluación del régimen de humedad del suelo bajo diferentes usos, en los paramos Las Animas (Municipio de Silvia) y Piedra de León (Municipio de Sotará), Departamento del Cauca. Tesis de grado. Fundación Universitaria de Popayán, Colombia.
- Farley, K.A., Kelly, E.F., Hofstede, R.G.M., 2004. Soil organic carbon and water retention after conversion of grasslands to pine plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems* 7, 729–739.
- Fehse J, Hofstede R, Aguirre N, Paladines C, Kooijman A, Sevink J. High altitude tropical secondary forests: a competitive carbon sink? *Forest Ecology and Management*, 163, 9-25.

- Fleischbein, K., Wilcke, W., Goller, R., Boy, J., Valarezo, C., Zech, W., Knoblich, K., 2005. Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrological Processes* 19, 1355–1371.
- Fleischbein K, W Wilcke, C Valarezo, W Zech, K Knoblich. 2006. Water budgets of three small catchments under montane forest in Ecuador: experimental and modelling approach. *Hydrological Processes* 20, 2491 – 2507.
- Hofstede, R.G.M. 1995. Effects of burning and grazing on a Colombian páramo ecosystem. Ph.D. thesis, Universiteit van Amsterdam.
- Hofstede, R.G.M., Mondragon, M.X., Rocha, C.M., 1995. Biomass of grazed, burned, and undistributed páramo grasslands, Colombia. 1. Aboveground vegetation. *Arctic and Alpine Research* 27, 1–12.
- Holder C. 2006. The hydrological significance of cloud forests in the Sierra de las Minas Biosphere Reserve, Guatemala. *Geoforum*, 37, 82-93.
- Letts M. 2003. Carbon Assimilation and Productivity in a North-west Andean Tropical Montane Cloud Forest. PhD Thesis. King's College London, University of London, Inglaterra.
- Leuschner C, Moser G, Bertsch C, Roderstein M, Hertel D. 2007. Large altitudinal increase in tree root/shoot ratio in tropical mountain forests of Ecuador. *Basic and Applied Ecology* 8, 219-230.
- López R. 1998. ¿Páramo yungueño, pradera parámica? ¿Por que identificamos las formaciones situadas sobre la ceja de montaña con el páramo?. *Ecología en Bolivia* 31, 93-95.
- Molina A. 2008. Land use change, runoff and erosion in a degraded catchment in the Andes : Determining pathways of degradation and recovery. PhD thesis. Universidad Católica de Lovaina, Belgica.
- Nadkarni N, Schaefera D, Matelsona T, Solano R. 2004. Biomass and nutrient pools of canopy and terrestrial components in a primary and a secondary montane cloud forest, Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 198, 223-236.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J.L., Collinet, J., 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of andisols from the Ecuadorian páramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45, 185–207.
- Pounds JA, MPL Fogden, JH Campbell. 1999. Biological response to climate change on a tropical mountain. *Nature* 398, 611-615.
- PROMAS, 2004. Efectos de la cobertura vegetal en la regulación hidrológica de microcuencas de páramo. Informe de proyecto. Universidad de Cuenca, Ecuador.

- Quichimbo P. 2008. Efecto de la forestación sobre la vegetación y el suelo. Tesis de grado. Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Ravnborg H. 2003. Poverty and Environmental Degradation in the Nicaraguan Hillsides. *World Development*, 31, 1933-1946.
- Roderstein M, Hertel D, Leuschner C. 2005. Above- and below-ground litter production in three tropical montane forests in southern Ecuador. *Journal of Tropical Ecology*, 21, 483-492.
- Romero C. 2005. A multi-scale approach for erosion assessment in the Andes. PhD Thesis. Wageningen Universiteit, Holanda.
- Strudleya M, Green T, Ascough J. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 99, 4-48.
- Thierfeldera C, Amézquita E, Stahra K. 2005. Effects of intensifying organic manuring and tillage practices on penetration resistance and infiltration rate. *Soil and Tillage Research*, 82, 211-226.
- Tobón C. 2008. Los bosques andinos y el agua. Publicación de ECOBONA. pp 68.
- Vanacker, V., Govers, G., Barros, S., Poesen, J., Deckers, J., 2003. The effect of short-term socio-economic and demographic change on land use dynamics and its corresponding geomorphic response with relation to water erosion in a tropical mountainous catchment, Ecuador. *Landscape Ecology*, 18, 1-15.
- Vanacker V, von Blanckenburg F, Govers G, Molina A, Poesen J, Deckers J, Kubik P. 2007. Restoring dense vegetation can slow mountain erosion to near natural benchmark levels. *Geology*, 35, 303-306.
- Wilcke W, Yasin S, Abramowski U, Valarezo C, Zech W. 2002. Nutrient storage and turnover in organic layers under tropical montane rain forest in Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 53, 15-27.
- Wilcke W, Hess T, Bengel C, Homeier J, Valarezo C, Zech W. 2005. Coarse woody debris in a in Ecuador: mass, C and nutrient stock, and turnover. *Forest Ecology and Management* 205, 139-147.
- Wilcke W, Günter S, Alt F, Geißler C, Boy J, Knuth J, Oelmann Y, Weber M, Valarezo C, Mosandl R. Response of water and nutrient fluxes to improvement fellings in a tropical montane forest in Ecuador. Accepted by *Forest Ecology and Management*.
- World Meteorological Organization, 1994: Guide to Hydrological Practices. Fifth edition, WMO-No. 168, Geneva.

Zimmermann A, Wilcke W, Elsenbeer H. 2007. Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Hydrology* 343, 80-96.

ANEXO 1: Memorias del Taller de Papallacta, Ecuador. Septiembre 2008.

**CONDESAN SINTESIS 2008
- PRODUCTO 1 -**

**INFORME DEL TALLER DE EXPERTOS
PAPALLACTA, ECUADOR
7-9 de Septiembre de 2008**

INDICE

1. Objetivos del taller
2. Participantes
3. Resultados
 - 3.1. Bosques
 - 3.2. Paramos
 - 3.3. Humedales
4. Conclusiones

Anexos

- A. Documento guía del taller
- B. Programa

1. OBJETIVOS DEL TALLER

El taller tuvo como objetivo recoger conocimientos de investigadores expertos en distintos ecosistemas andinos sobre los siguientes temas:

- 1) la determinación del servicio hidrológico (SH) de cada ecosistema Andino,
- 2) la determinación de los procesos hidrológicos que determinan el SH
- 3) la determinación de la reducción o alteración de este SH debido a influencia humana,
- 4) la determinación de la información y conocimiento clave en la relación ecosistema-agua necesario para establecer un esquema efectivo de pago o compensación por servicios ambientales
- 5) la identificación de las relaciones entre los servicios hidrológicos y otros servicios ambientales como carbono, biodiversidad

2. PARTICIPANTES

Wouter Buytaert	Páramos, Modelación hidrológica	Universidad de Bristol, Inglaterra
Rolando Céleri	Coordinador del Taller	Universidad de Cuenca, Ecuador
Manuel Contreras	Humedales	Centro de Estudios Ambientales, Chile
Bert De Bièvre	Coordinador PPA	CIP-CONDESAN, PPA
Jorge Molina	Puna y bosques andinos	Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia
Thorsten Pohlert	Modelación hidrológica	Universidad de Mainz, Alemania
Conrado Tobón	Páramos y Bosque andino lluvioso y nublado	Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia
Wolfgang Wilcke	Bosque andino lluvioso y nublado	Universidad de Mainz, Alemania

3. RESULTADOS

3.1. BOSQUES

Estado del conocimiento de la hidrología de bosques naturales

- Se conoce que existen mediciones en Estación Científica San Francisco (Loja, Sur del Ecuador) y en Colombia, enfocadas únicamente en ecosistemas prístinos
- Sobre procesos hidrológicos, se conoce que la intercepción de agua lluvia en el dosel es alta. Luego, el agua que llega al suelo fácilmente se infiltra debido a las características de los suelos (alta capacidad de infiltración y almacenamiento) y su origen (suelos orgánicos).
- Estos procesos hacen que se tenga una alta regulación y un buen rendimiento hídrico. Sin embargo, hay un consenso que la regulación es más relevante que el rendimiento. Por consiguiente, el servicio ambiental más importante de los bosques es la regulación del ciclo hidrológico.
- Se establece que la cobertura vegetal y los suelos son las variables que regulan el ciclo hidrológico en el bosque. El papel de la hojarasca también es muy importante.
- Se reconoce que existen diferencias entre los resultados de investigaciones desarrolladas en diferentes sitios. La razón es que las metodologías de medición de procesos, como por ejemplo captura por neblina, no son estándar y así se estima que hay grandes errores en las mediciones. Se ha encontrado que mientras un 42 % de la humedad del aire es capturada por neblinómetros, la vegetación solo puede capturar un 12 %. Además existen problemas con otros sensores: descalibración, o no son desarrollados para bosques nublados.
- Aun existe muy poco conocimiento sobre la calidad del agua de bosques no intervenidos. Sin embargo, existe una buena base de datos de la calidad química del agua de la Reserva Biológica San Francisco y también hay alguna información de otros lugares.

Estado del conocimiento de los efectos del cambio de uso de suelos en los servicios hidrológicos

- No se conocen estudios científicos comparativos en los Andes (aunque quizás si hayan pero no están documentados) que estudien los efectos del cambio de bosque a agricultura o pasto mediante cuencas pareadas.
- Solamente en Costa Rica, México, Guatemala y Asia se encuentran estudios con cuencas pareadas en especial para conversiones a agricultura y a plantaciones de café.
- En estos sitios fuera de los Andes se ha encontrado que el cambio produce un aumento en el rendimiento anual (volumen total anual de agua que sale de la cuenca en forma de escorrentía) y una fuerte reducción en la regulación con una marcada disminución del flujo base, llegando los cauces incluso a secarse en años secos.
- El mayor problema con el cambio de uso es entonces la pérdida de la regulación natural del ciclo hidrológico, el cual, como se indicó anteriormente, es el SAH más relevante, y no el volumen total anual.

Relación del SA hidrológico con otros servicios ambientales

- Al remover los bosques para iniciar ganadería se pierde la biodiversidad y también las propiedades de regulación hídrica. De esta manera todo el sistema hidrológico aguas abajo es afectado, lo cual incide en la vida acuática. Por ejemplo, la respuesta hidrológica del ecosistema proporciona las condiciones para que se desarrolle vida acuática en los ríos o cauces. Si el hidrograma de respuesta del ecosistema cambia debido a la remoción del bosque (por ejemplo con un aumento en caudales pico y reducción de flujos base), diferentes formas de vida acuática serán afectadas.
- Aparentemente existe una relación entre precipitación y la biodiversidad del bosque. Dados que la magnitud y variabilidad espacial del agua que atraviesa el dosel del bosque es muy estable en el tiempo (que depende de sitios con mayor o menor cobertura dentro del bosque) es probable que ayudan a creación de nichos ecológicos.

3.2. PARAMOS

Estado del conocimiento de la hidrología de paramos naturales

- Existen investigaciones desarrolladas en varios sitios de los Andes, enfocadas tanto en páramos prístinos como intervenidos y cubriendo varias escalas espaciales y temporales.
- Se reconoce que el principal servicio hidrológico es la regulación de caudales, pero en cuanto a volumen total anual “producido” el páramo también es muy bueno.
- Se tiene un alto conocimiento de lo que sucede entre entradas y salidas. Los principales factores que afectan el ciclo hidrológico en el páramo son:
 - Profundidad de suelos.
 - Propiedades hidrofísicas y químicas de los suelos.
 - Precipitación continua y niebla permanente a lo largo del año. Esto produce una baja evapotranspiración y una alta humedad, lo que se traduce en una saturación permanente de los suelos.
- A diferencia de los bosques, la intercepción y evapotranspiración del pajonal es mucho mas baja. Quizás el papel más importante de los pajonales es la protección del suelo.
- Se conoce que la calidad del agua proveniente de los paramos es buena y que existe una baja producción de sedimentos por lo que hay un bajo tratamiento para potabilización. Sin embargo es posible que sustancias húmicas producidas en humedales den al agua un color difícil de remover. En general falta mucha investigación para determinar los estándares de calidad de agua de páramos naturales.
- Se reconoce que la presencia de humedales y lagunas tiene una alta importancia en el ciclo hidrológico del páramo, pero aun no hay investigaciones para establecer las interrelaciones.

Efectos del cambio de uso de suelos en los servicios hidrológicos

- La agricultura en el páramo reduce fuertemente la regulación natural, ocasionando la ocurrencia de caudales pico más altos y caudales base más bajos. El rendimiento hídrico anual se reduce ligeramente.
- Las plantaciones de pinos producen una reducción bastante fuerte de los caudales base (más fuerte que la agricultura), pero reducen la ocurrencia de crecidas normales. El rendimiento hídrico anual se reduce significativamente. Sin embargo en crecidas excepcionales, el efecto de las plantaciones es despreciable y los caudales de cuencas naturales y con plantaciones es idéntico.
- Sin embargo, para páramos muy degradados en donde la destrucción del suelo es total, la forestación con pinos puede producir una recuperación del servicio hidrológico.

Relación del SA hidrológico con otros servicios ambientales

- El suelo del páramo es un gran reservorio estable de carbono que ha sido acumulado durante miles de años. Si se desarrollan prácticas agrícolas se libera carbono y hasta se puede perder suelo. Por lo tanto, la conservación del páramo apoya la conservación de suelos y el mantenimiento de carbono.
- A largo plazo la siembra de pinos puede contribuir al almacenamiento neto de carbono (considerando que no solo capturan carbono de la atmósfera sino que también extraen carbono del suelo). Durante el crecimiento el balance es cercano a cero. Si se cortan los árboles, entonces existe una pérdida neta de carbono.
- Normalmente además, la cosecha de árboles implica destrucción de los suelos y su erosión hasta el establecimiento de vegetación, lo que también produce liberación de carbono ahora fijado en el suelo.
- La erosión también conlleva a la degradación de la calidad del agua debido al ingreso de materia orgánica y quizás a altos contenidos de aluminio en el agua. Esto puede ocasionar problemas en el tratamiento de aguas.

3.3. HUMEDALES

Estado del conocimiento

- Los humedales funcionan como un filtro, un decantador o trampa de sedimentos y nutrientes provenientes de las cuencas. Por ello se los considera como la parte más sensible de las cuencas ya que cualquier cambio en las mismas tendrá un impacto en ellos.
- El servicio hidrológico más importante de humedales altoandinos es la regulación de caudales. En humedales endorreicos el SA hidrológico es mucho menor.
- Las investigaciones sobre humedales altoandinos han sido descriptivas y no funcionales. Por ello se conoce los componentes de cada humedal estudiado (por ejemplo su limnología, especies, volumen), pero no se conocen los procesos y el funcionamiento de los mismos.
- Se considera que en humedales altoandinos el mayor control de la productividad está en factores físicos (tiempo de residencia, temperatura, carga de nutrientes) y no tanto en químicos o biológicos debido a que estos últimos ocurren mucho más lento. Por lo tanto se estima que los efectos del cambio climático serán grandes en estos humedales ya que un ligero cambio en la temperatura ocasionará un aumento en la productividad primaria (sin necesidad de aumento en la carga de nutrientes) lo cual puede llevarlos a niveles de eutrofización.

Efectos del cambio de uso de suelos en los servicios hidrológicos

- No se tiene conocimiento de estudios de los impactos de cambios en los caudales de entrada, cambios en la temperatura o aumento en la carga de nutrientes en humedales altoandinos.
- Debido a la estrecha relación entre humedales y cuenca hidrográfica, se estima que un cambio en el uso de la cuenca con la introducción de ganado vacuno e incluso con la reintroducción (o sobrepastoreo) de camélidos tendrá un alto impacto en los mismos.
- Los efectos de cambios estarán en la calidad del agua y en la reducción de la regulación.

Relación del SA hidrológico con otros servicios ambientales

- Evidentemente existe una estrecha relación entre el servicio hidrológico y otros servicios ambientales (por ejemplo biodiversidad acuática), pero no existen investigaciones para cuantificarlas.

4. CONCLUSIONES GENERALES

Las principales conclusiones son:

- Para el caso de la puna y jalca no se conoce de investigaciones que puedan apoyar la determinación de SA hidrológicos en forma certera y cuantitativa.
- Es necesario entender los procesos hidrológicos (importancia de la cobertura vegetal y los suelos, mecanismos de generación de escorrentía entre otros) que generan el servicio ambiental hidrológico para poder valorar los servicios. Por ello, es necesario emprender nuevas iniciativas de investigación en el tema.
- Los bosques sin o con neblina deben ser diferenciados en los estudios y análisis.
- Aun es poco el interés en extrapolar resultados a otras áreas pero en poco tiempo será mucho mayor. Por lo tanto es imprescindible invertir en proyectos de investigación que produzcan resultados focalizados en corto y mediano plazo (1-3 años).

- Debido a que la calidad de estudios depende del grado de información disponible es muy importante empezar a generar datos en los sitios de interés. Los datos tal y como se encuentran en las instituciones nacionales encargadas del monitoreo hidrometeorológico son insuficientes para estos estudios.
- Es necesario tener protocolos estandarizados para el control de la calidad de datos y su procesamiento.
- Hay la necesidad de identificar índices apropiados para poder comparar los resultados de estudios sobre SA hidrológicos entre diferentes sitios de monitoreo o investigación.
- Es muy importante determinar y/o desarrollar modelos hidrológicos apropiados para la región.

Posibilidad de escalar resultados de micro-cuencas de investigación a cuencas más grandes

- Se parte del hecho que actualmente el escalamiento es uno de los temas más importantes (hot topic) de las investigaciones hidrológicas mundiales. Por ello, el escalamiento es muy complicado ya que depende de muchos aspectos.
- Para los Andes, en principio se establece que si en la nueva escala la cobertura es la misma (por ejemplo, al menos con el mismo porcentaje de bosque con las mismas características) y el clima es similar, el escalamiento es posible.
- Sin embargo, si en la nueva escala se introducen nuevos usos de tierra donde el porcentaje de los bosques se reduce significativamente, las propiedades hidrológicas del bosque se vendrán a diluir. Por ejemplo, la atenuación de crecidas regulares ya no será evidente y en el caso de flujos base, es posible que todo el flujo base a la salida de la cuenca grande provenga únicamente del bosque. Igualmente si el clima cambia significativamente (diferencias en precipitación, insolación, temperatura, etc.) la precisión del escalamiento también se verá reducida.
- En conclusión, hace falta más investigación para tener una mejor predicción de los efectos que se producen al escalar. Para ello es necesario contar con cuencas equipadas con equipos de monitoreo en diferentes escalas (cuencas anidadas) y con un mayor número de sitios de monitoreo a lo largo de los Andes.

Posibilidad de extrapolar los resultados de micro-cuencas de investigación a otros sitios

- Dadas las circunstancias, la extrapolación de resultados a otros sitios es aun muy subjetiva. Si se basa únicamente en la proporción de la cuenca con área de bosques y si los suelos son similares, entonces es posible tener resultados **cuantitativos**. Sin embargo, resultados cuantitativos de buena precisión serán muy difíciles de lograr.
- Para el caso de bosques, las pérdidas de agua por interceptación dependen mucho del dosel y pueden variar en un rango muy amplio. Por lo tanto se debe conocer muy bien las características del dosel para poder extrapolar los resultados.
- Por otro lado, el éxito en la extrapolación de resultados dependerá mucho de conocer al menos algunos detalles de la hidrología de las cuencas de interés (precipitaciones y caudales principalmente). De aquí se formulan las siguientes preguntas:
 - ¿Existe la disposición a invertir en un sistema de monitoreo (mínimo) que proporcione información hidrológica básica de la cuenca de interés?
 - Si el propósito es establecer mecanismos de compensación por servicios ambientales, ¿por qué no iniciar conociendo cuantitativamente el estado del servicio ambiental?
- Definitivamente la calidad y densidad del sistema de monitoreo dependerá de varios factores como por ejemplo el número de personas que están beneficiándose del servicio ambiental hidrológico. Así, la cuenca que abastece de agua potable a Quito o Bogotá necesitará un monitoreo más detallado que una cuenca que abastece a una pequeña población donde un monitoreo mínimo será suficiente.

5. RECOMENDACIONES

Como recomendaciones para avanzar en procesos de conocimiento de los recursos hídricos de los Andes se sugieren las siguientes:

a) Crear una base de datos temática colocada en el Internet que esté disponible a todos los interesados

Justificación: Además de lo útil que resultaría disponer de esos datos para calibrar modelos hidrológicos, la base de datos es esencial para el trabajo de escalamiento (y regionalización), uno de los temas tratados en el taller.

Dos cosas son esenciales para esta tarea: una institución u organización que se haga cargo y la voluntad de proporcionar datos de las instituciones que generan datos.

Hay varias bases de datos temáticas disponibles por internet que son un modelo a seguir como por ejemplo la base de datos experimentales sobre rotura de presas de la IARH (Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas) o la base de datos climáticos, hidrológicos, hidroquímicos y cartográficos de la Amazonia del observatorio ORE-HYBAM.

b) Avanzar en el proceso de regionalización de los datos climáticos.

Justificación: La regionalización es muy importante para entender el comportamiento climático en la región altoandina. Existen herramientas estadísticas (vector regional, análisis de componentes principales...) y de otro tipo que ayudan mucho. La regionalización es importante también para el análisis de la calidad de los datos y para los procesos de escalamiento y extrapolación. De hecho, en muchos aspectos escalamiento es equivalente a regionalización.

Documento guía para el taller de Papallacta 7-9 de Septiembre, 2008

Antecedentes

El taller es parte de una amplia iniciativa de CONDESAN (Consortio para el desarrollo sostenible de la eco-región Andina), elaborada alrededor de los servicios ambientales para la conservación de los recursos hídricos.

En los últimos años, numerosas organizaciones han desplegado muchos esfuerzos por documentar y sistematizar diversas experiencias de pago o compensación por servicios ambientales. Sin embargo ninguna se ha enfocado específicamente en los servicios ambientales relacionados con la conservación de los recursos hídricos en el ecosistema de montaña a nivel regional con un corte andino (i.e. los Andes). Es allí donde CONDESAN ha decidido concentrar sus esfuerzos.

Para lograrlo, CONDESAN ha identificado 3 productos clave:

- 1) conocer cuáles son los servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes
- 2) conocer cuál es el estado de la acción (un análisis eco-regional de diversos casos de esquemas de pago o compensación por servicios ambientales en los Andes) y
- 3) conocer cuál es el estado de la política para la aplicación de estos esquemas.

Una de los mecanismos para completar el producto 1, es el desarrollo de un taller de expertos en conocimientos hidrológicos de varios ecosistemas de los Andes, a ser desarrollado en Papallacta.

Objetivo del producto 1: Estado actual del conocimiento técnico científico sobre los servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes

Existen 3 objetivos específicos para el producto 1:

- 1) Profundizar el conocimiento existente sobre el ciclo hidrológico en los ecosistemas andinos (i.e. entender cuál es el servicio hidrológico y cómo se genera)
- 2) Entender mejor las relaciones entre los servicios ambientales hídricos y otros servicios ambientales como carbono, biodiversidad
- 3) Determinar la información y conocimiento clave en la relación ecosistema-agua para un esquema efectivo de pago o compensación por servicios ambientales

Los ecosistemas naturales andinos considerados en este estudio son: páramo, bosques nativos, humedales, puna y jalca.

Por otro lado, los servicios hidrológicos corresponden al régimen hidrológico de un ecosistema natural y pueden ser clasificados de varias formas:

- regulación del ciclo hidrológico
 - variabilidad estacional
 - mantenimiento de caudales base
 - frecuencia y magnitud de caudales pico
 - rapidez de respuesta a eventos de precipitación (flashiness)
- mantenimiento de la calidad del agua
 - agua químicamente buena/excelente (e.g. sin contaminantes)
 - agua libre de sedimentos
- recarga de acuíferos
- otros

Sin embargo, estos servicios hidrológicos se pueden ver reducidos al existir una conversión de los ecosistemas naturales a ecosistemas intervenidos por el hombre, en especial debido a cambios de uso de tierras y otras prácticas, tales como:

- agricultura
- ganadería (intensiva o extensiva)
- quemas
- otros

Solamente al cuantificar la disminución del servicio hidrológico, se podrá conocer el valor real de conservar los ecosistemas naturales.

Objetivos del taller

Con estos antecedentes, el conocimiento que se busca conseguir del taller es:

- 1) la determinación del servicio hidrológico (SH) de cada ecosistema Andino,
- 2) la determinación de los procesos hidrológicos que determinan el SH
- 3) la determinación de la reducción o alteración de este SH debido a influencia humana,
- 4) la determinación de la información y conocimiento clave en la relación ecosistema-agua necesario para establecer un esquema efectivo de pago o compensación por servicios ambientales
- 5) la identificación de las relaciones entre los servicios hidrológicos y otros servicios ambientales como carbono, biodiversidad

Por este motivo, las presentaciones deberán enfocar estos asuntos identificando dónde existe conocimiento existente y dónde están los vacíos.

**PROGRAMA DEL TALLER DE PAPALLACTA
7-9 de Septiembre, 2008**

Fecha	Hora		Actividad
Sábado 6			Llegada a Quito
Domingo 7	7h45	8h00	Reunión en Hotel Embassy
	8h00		Salida a Papallacta
	10h00	10h30	Llegada y registro en Termas Papallacta
	10h30	10h45	Bienvenida, objetivos (Bert De Bièvre)
	10h45	11h00	Instrucciones (Rolando Céleri)
			Bosques Andinos
	11h00	11h45	Conrado Tobón
	11h45	12h30	Jorge Molina
	12h30	13h15	Wolfgang Wilcke
	13h15	14h30	Almuerzo
Lunes 8	14h30	15h15	Thorsten Pohlert
	15h15	18h00	Discusión y conclusiones
	7h30	8h30	Desayuno
	8h30	9h00	Resumen de conclusiones sobre Bosques Andinos
			Páramo
	9h00	9h45	Wouter Buytaert
	9h45	10h30	Conrado Tobón
	10h30	10h45	Coffee break
	10h45	13h00	Discusión y conclusiones
	13h00	14h30	Almuerzo
Martes 9			Humedales de altura
	14h30	15h15	Manuel Contreras
	15h15	18h00	Discusión y conclusiones
	7h30	8h30	Desayuno
	8h30	9h00	Resumen de conclusiones sobre Páramo y Humedales de altura
			Jalca y puna
	9h00	9h30	Discusión y conclusiones
			Temas generales
	9h30	10h00	Wouter Buytaert (process-based modelling of land use change impacts)
	10h00	10h30	Discusión y conclusiones
10h30	10h45	Coffee break	
10h45	11h15	Por definirse	
11h15	11h45	Discusión y conclusiones	
		Conclusiones del taller	
11h45	13h00	Conclusiones	
13h00	14h30	Almuerzo	
14h30	16h30	Conclusiones	
16h00		Salida a Quito	
Miércoles 10			Salida de Quito