

dossier

Ingeniería y Agua



FOTOGRAFÍAS DE
OSCAR SANABRIA

Carlos Parra

Editor Invitado

EDITORIAL

El uso del agua se ha intensificado con el crecimiento de la población y con el incremento de la industrialización. Mientras que en el siglo XX la población mundial se triplicó, el uso del agua se multiplicó por seis. Los usos para irrigación sumaron aproximadamente el 70%, los usos industriales el 20 % y las municipalidades el 10%. El territorio de Colombia hace parte de una de las regiones más privilegiadas en materia de disponibilidad de recursos hídricos en el planeta. La disponibilidad potencial de agua en el año 2.000 se estimaba para Colombia en más de un millón de m³ de agua por Km² de territorio por año, mientras que varios países del norte de África, el Medio Oriente y Australia tenían menos de cincuenta mil m³ por Km² por año. Sin embargo, algunas zonas del país tienen situaciones preocupantes de estrés hídrico, en especial aquellas regiones en donde se encuentran las ciudades con mayor población y con mayor concentración de industria, comercio



y servicios, y que están rodeadas de áreas suburbanas y rurales con usos agropecuarios intensivos. La región de la sabana de Bogotá y sus áreas vecinas presenta actualmente diversos conflictos por el uso del agua, conflictos que se incrementarán en las próximas décadas con el crecimiento poblacional y con la intensificación y la diversificación de la demanda del agua.

La problemática que se vislumbra para las próximas décadas en materia de escasez del agua es motivo de preocupación mundial, pues las proyecciones de las tendencias actuales muestran que la mayor parte de la población mundial y decenas de países van a presentar situaciones muy críticas con el suministro de agua. El déficit en materia de recursos hídricos es un factor decisivo en el deterioro de los estándares de vida de la población que retarda el desarrollo económico y social en los países en desarrollo. Las tendencias señalan que para la primera mitad del siglo XXI



los problemas relacionados con el agua serán de la mayor importancia para la humanidad.

Se requiere la adopción oportuna de políticas y el diseño de soluciones a niveles global, regional, nacional y local, que van desde la preservación de los recursos naturales, el uso más eficiente del recurso y una mejor gestión. Lo anterior va a requerir enormes esfuerzos económicos, tecnológicos, políticos y sociales. Las soluciones que se han vislumbrado con mayor potencial de obtención de resultados en el presente y en el futuro cercano están relacionadas con la protección de los recursos naturales; la drástica reducción del consumo mediante el uso más eficiente del agua en cada uno de los procesos, en especial en los usos para riego e industria; la reducción hasta su virtual eliminación de las descargas de aguas residuales a las corrientes naturales; la mejor utilización de las corrientes locales mediante la construcción de embalses reguladores estacionales y de largo plazo;

la utilización de aguas saladas; la influencia activa sobre los procesos de formación de lluvias; el uso de almacenamientos de agua en lagos, acuíferos subterráneos y glaciares; y la redistribución territorial de los recursos hídricos. Todos estos son amplios campos de actuación, no exentos de efectos sobre el medio ambiente, en los cuales se deben hacer grandes esfuerzos para la reducción del déficit de agua que se vislumbra para el futuro inmediato. Solamente el desarrollo continuado de trabajos concienzudos interdisciplinarios permitirá superar la crisis que se vislumbra.

Presentamos en el dossier diez artículos inmersos en dos tendencias distintas. La primera parte se dedica a artículos de interés general, aptos para todo tipo de lectores que se interesan o quieren acercarse al tema del agua. Para la segunda parte se han seleccionado artículos de carácter técnico, los cuales cubren diversos tópicos de la tecnología del agua.

Páramos: Hidrosistemas Sensibles

Mario A. Díaz-Granados Ortiz

Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.

Juan D. Navarrete González

Egresado del Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Fonade, Convenio de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Tatiana Suárez López

Estudiante de Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes.

PALABRAS CLAVE: Páramos, hidrología de alta montaña, modelación hidrológica.

KEY WORDS: Páramo, high mountain hydrology, hydrologic modeling.

Recibido el 9 de septiembre de 2005, aprobado el 25 de octubre de 2005.

RESUMEN Los páramos son ecosistemas zonales ubicados principalmente en las montañas tropicales de Centro y Suramérica, aproximadamente entre 3000 y 4500 msnm y conforman un piso altitudinal de las cordilleras de los trópicos. Sus características especiales generan tipologías florísticas, ecológicas, edafológicas, geomorfológicas y climáticas especiales. Tienen gran importancia ecológica, genética y científica, por su flora endémica y paisajes, así como por su función socioeconómica, al ser fundamentales para la regulación hídrica natural regional para el abastecimiento de agua a sus ciudades y como medio de soporte de actividades antrópicas. Como hidrosistemas, las cuencas paramunas han sido objeto de análisis cuantitativos de su balance hídrico. En este trabajo se presenta una aproximación de la modelación hidrológica de estos hidrosistemas mediante la integración del modelo AvSWAT, un modelo de precipitación horizontal y un sistema de información geográfica. El modelo se implementó en la cuenca Alta del Río Blanco, una de las principales corrientes hídricas en el Páramo de Chingaza, principal fuente de agua de la ciudad de Bogotá. Se resalta la necesidad de proteger estos sistemas para preservar el régimen de caudales, especialmente los correspondientes a épocas de estiaje.

ABSTRACT Páramos are vulnerable zonal ecosystems located in the tropical mountains of Central and South America, approximately between 3000 and 4500 meters above the sea level. Their special characteristics generate particular floral, ecological, edaphological, geomorphological and climatic typologies. Páramos have great ecologic, genetic and scientific importance due to their endemic flora and landscapes, as well as their socio-economical functions, represented by their fundamental roll in water regulation for water supply in some cities downstream. Some efforts have been done to quantify the water balance in these special hydrosystems. This paper presents an approximation to the hydrologic modeling of these hydrosystems, based on the integration of the AvSWAT model, a horizontal precipitation model, and a geographic information system. As a case study, the upper Blanco river basin was analyzed. This basin is one of the principal areas of the Chingaza páramo, the main Bogotá City water supply source. Protection of these ecosystems is stressed in order to preserve flow regimes, mainly those associated with dry conditions.

INTRODUCCIÓN

Los páramos son ecosistemas de gran riqueza ecológica y, a su vez, juegan un importante papel en la economía de sociedades andinas por su valor agrícola e hídrico. Su importancia ecológica, genética y científica se basa en sus paisajes únicos y flora endémica, la cual se ha acondicionado a sus extremas condiciones climáticas y a las características de sus suelos. Cumplen una importante función social y económica para algunas comunidades dedicadas a la actividad agrícola en estas zonas, y son fundamentales en la regulación natural regional, gracias a que su vegetación y las características de sus suelos retienen el agua controlando la escorrentía superficial, reduciendo picos y protegiendo de la erosión a las zonas bajas.

La necesidad de la modelación hidrológica de los sistemas de páramo ha sido ampliamente discutida como lo presentan Sáenz et al. (2001) y enfatizan Bruinjeel y Hamilton (2000). La mayoría de la investigación en páramos se ha enfocado a su flora y fauna, aunque existen pocos estudios sobre los procesos hidrológicos propios de estos sistemas. Cuantificaciones del balance hídrico con modelos tradicionales de hidrología de cuencas muestran una subestimación de su producción hídrica real (Ver Domínguez, 1999; Montoya y Díaz-Granados, 1998), lo cual podría deberse a la no contabilización del importante aporte hídrico del agua contenida en la atmósfera e interceptada por las plantas (denominada precipitación horizontal) y que no es registrada en las estaciones de medición de lluvia.

En este trabajo se presentan las características más relevantes de los páramos; se enfatiza en la habilidad que tienen en la regulación de los caudales; se ilustra la modelación del balance hídrico en la cuenca paramuna del río Blanco en el páramo de Chingaza, fuente principal de agua para la ciudad de Bogotá, mediante la implementación del modelo AVSWAT 2000 integrado con un modelo de precipitación horizontal. Además, se recalca la necesidad de su preservación y manejo sostenible para garantizar la disponibilidad, presente y futura, de abastecimiento de agua en muchas comunidades y municipios colombianos.

CARACTERÍSTICAS DE LOS PÁRAMOS

Los páramos son ecosistemas zonales ubicados por encima del límite superior del bosque cerrado, o bosque de niebla, y por debajo del límite superior de vida en las montañas tropicales de centro y sur América (Hofstede, 1997; Luteyn, 1999). Perú, Ecuador, Colombia, Venezuela y Costa Rica son los principales países de América que poseen estos ecosistemas (Monasterio, 1986), aunque también algunos autores asocian características similares a bosques alpino-tropicales de islas del Pacífico y África. En América se encuentran entre los 3000 y 4800 msnm aproximadamente (Verweij, 1995) con un área aproximada de 35.000 km², ubicados entre las latitudes 8°N y 11°S. En Colombia, el área aproximada de páramos es de 14.000 km², que equivalente al 1.3% del territorio nacional. Los departamentos colombianos con mayor representatividad de páramos son en su orden Boyacá (18.3%), Cundinamarca (13.3%), Santander (9.4%), Cauca (8.1%), Tolima (7.9%) y Nariño (7.5%) (Minambiente, 2001). El límite inferior de los páramos es variable según la latitud, la vertiente, el clima global y la actividad humana. Así, cerca del ecuador puede estar a más de 3600 msnm, mientras que en Centroamérica se ubica a 3100 msnm (Weber, 1959); en Colombia, en las cordilleras central y occidental está a 3500 msnm y en la oriental a 3600 msnm. La zonificación típica utilizada en la alta montaña colombiana corresponde a bosque alto andino (3000 a 3200 msnm), páramo bajo o subpáramo (entre 3200 y 3500 o 3600 msnm), páramo propiamente dicho (entre 3500 o 3600 y 4100 msnm) y superpáramo (entre 4100 y 4500 msnm). La acción antrópica sobre los bosques andinos, principalmente quemados y tala, ha hecho desaparecer extensiones de bosque ubicados por debajo de los páramos, generando zonas con microclimas característicos de páramo, que muestran un aparente descenso del nivel inferior de páramo.

La evapotranspiración en los páramos es baja y la capacidad de retención de agua de las plantas es alta. Además de la lluvia, en los páramos la precipitación

horizontal es un factor determinante en el importante rendimiento hídrico presente en estos hidrosistemas. Debido a las bajas temperaturas y alta humedad relativa, la descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo a tasas muy bajas, por lo cual los suelos tienen altos contenidos de materia orgánica, alta porosidad y buena conductividad hidráulica.

CLIMA DE PÁRAMO

En los páramos colombianos, la humedad se manifiesta por el rocío, la constante neblina y las lloviznas frecuentes: características de las altas montañas tropicales de clima húmedo. Esta gran humedad no está directamente relacionada con una precipitación alta, ya que a pesar de que existen regiones donde la precipitación anual es superior a 3000 mm, muchos páramos tienen una precipitación media anual aproximada de 1000 mm o menos. Sin embargo, por las bajas temperaturas y la alta nubosidad, la evapotranspiración es reducida y es ésta una de las principales razones del alto rendimiento hídrico de estos ecosistemas.

Los páramos presentan condiciones ambientales extremas debido a su baja temperatura media diaria, alto promedio diario de humedad relativa, baja presión atmosférica, escasa densidad del aire, alta radiación solar, cambios intradiurnos bruscos de temperatura y humedad, y suelos ácidos (ver Sáenz, 2001). A menudo, grandes variaciones intradiurnas de temperatura y humedad pueden afectar el intercambio de vapor de agua y CO₂ entre las plantas y la atmósfera (Guhl, 1982; Mora-Osejo, 1995).

Las características climáticas varían dependiendo de la posición geográfica.

Las tasas de precipitación anual son variables. El período seco puede extenderse hasta tres meses a lo sumo y ocurre alrededor de diciembre y enero. Durante este período, la radiación solar puede ser muy alta al igual que la variación de la temperatura a lo largo del día (hasta 20°C en horas sol y temperaturas bajo cero durante la noche). El resto del año

típicamente constituye una sola estación húmeda con 40% o más de días lluviosos.

En Colombia las precipitaciones anuales en páramos oscilan entre valores bajos de 600 mm/año hasta más de 3000 mm/año. Según Rangel (2000), la clasificación de los páramos colombianos de acuerdo con la precipitación anual va desde páramos secos (<1200 mm) hasta pluviales (4050 mm). Es así como el porcentaje de páramos secos es de 6%, húmedos (entre 1770 y 2350 mm) de 89% y superhúmedos (entre 2950 y 3500 mm) de 5% (Geoingeniería - MMA, 1999). La variabilidad espacial de la precipitación está fuertemente relacionada con la topografía y con las direcciones de los aportes de humedad desde los océanos, la amazonia y la orinoquia, que hace que las vertientes de sotavento tengan menor precipitación que las de barlovento.

Otra fuente importante de agua en los hidrosistemas de páramo es la precipitación horizontal, que se refiere al proceso por el cual pequeñas gotas de agua presentes en las nubes o la niebla son movidas por el viento hacia la vegetación, donde son interceptadas y acumuladas en gotas más grandes que se precipitan, escurren por la superficie de las plantas o son absorbidas por ellas (Bruijnzeel y Proctor, 1993; Kerfoot, 1969; Cavelier y Goldstein, 1989; Juvik y Nullet, 1993; Schemenauer y Cereceda, 1994; Vogelmann, 1973). Este fenómeno ha sido estudiado en detalle en bosques de coníferas donde han sido desarrollados algunas mediciones y modelos (Kerfoot, 1969; Harr, 1982; Juvik and Nullet, 1993; Schemenauer and Cereceda, 1994). Cavelier y Goldstein (1989), con base en mediciones en un bosque húmedo tropical, señalan que la precipitación horizontal puede aportar hasta el 65% de las entradas hídricas a estos ecosistemas. Por otra parte, mediante mediciones con colectores de niebla en un páramo a 3500 msnm en Costa Rica, se estimaron valores equivalentes al 18% de la precipitación total (Dorewend, 1979, citado por Bruijnzeel y Proctor, 1993). Se ha establecido que la precipitación horizontal aumenta cuando disminuye la precipitación, constituyéndose éste en un factor

que no se puede despreciar cuando escasea la precipitación vertical (Cavelier y Goldstein, 1989). El rocío también puede ser un porcentaje importante dentro del balance hídrico en estos hidrosistemas, debido a las grandes diferencias de temperatura entre las horas del día y de la noche (Hofstede, 1997).

SUELOS

Los suelos de páramos son, por lo general, de origen volcánico y se caracterizan por ser húmedos y ácidos, con pH entre 3.9 y 5.4 (Guhl, 1982). El suelo paramuno es rico en humus bien descompuesto, de acidez considerable, enmohecido y de color pardo oscuro o negro; con un espesor que varía entre algunos centímetros y un metro (Suárez, 1989). En el páramo, la descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo a tasas muy bajas, debido a las bajas temperaturas y a la alta humedad (Hofstede y Sevink, 1995). La infiltración es generalmente alta debido a la presencia de suelos típicamente porosos relacionados con altos valores de conductividad hidráulica. La retención de agua es especialmente significativa, dado que en los primeros 30 cm de profundidad el agua ocupa el 61.7% del volumen total del suelo (CAR, 1988). Así, los suelos de páramo se caracterizan por tener altas porosidades y altas conductividades hidráulicas.

VEGETACIÓN

La vegetación en el páramo ha desarrollado características fisiológicas para adaptarse y sobrevivir a las extremas condiciones del clima, topografía y suelos. Algunas de estas características son la formación de rosetas que sirve de defensa contra viento y frío, la enanificación arbustiva, el desarrollo de hojas coriáceas que reduce la pérdida de agua por transpiración, la formación de cubiertas de pelos en las hojas para captar el agua de lluvia o de rocío, la permanencia de hojas muertas sobre los tallos (mantiene la temperatura, atrapa residuos orgánicos, almacena agua), la formación de macollas (trampa de materia orgánica y de humedad) y la agrupación de varias plantas pequeñas en cojines, entre otros (Salamanca, 1986). El clima es el factor determinante del tipo de vegetación

y de los mecanismos estratégicos que las plantas adoptan para amortiguar o reducir las condiciones de estrés a las cuales están sometidas, regulando por ejemplo la temperatura gracias a su envoltura, que controla la transpiración y la fotosíntesis, o presentando tejidos acuíferos que contribuyen al equilibrio hídrico. Las especies colombianas más importantes del páramo son: Frailejón que crece aproximadamente 5 mm/año por lo cual especímenes de 2 m de altura tienen una edad de cientos de años, Siete Cueros, Chuzque, Arnica, Chocho o Lupino, Pino Enano o Chite, Pegamosco o Pegapega, Musgos y Líquenes. En consecuencia, puede decirse que la vegetación en general intercepta y retiene agua, y con el control estomatal inhibe la evapotranspiración cuando las condiciones ambientales la promoverían.

REGULACIÓN HÍDRICA

La conjunción del clima de páramo y las características de vegetación y suelos hace que los hidrosistemas de páramo constituyan unos reguladores naturales de la escorrentía. Algunos autores les denominan las fábricas de agua. Otros le asocian el efecto de esponja a la regulación hídrica, mostrando su importancia en los flujos en épocas de estiaje. Efectivamente, en Colombia los páramos regulan el 70% de los ríos en sus cabeceras, aportan el 4% de la oferta hídrica superficial colombiana (Cepis, Minambiente, 2005) y un porcentaje importante de municipios andinos se abastecen de agua de estas fuentes —aproximadamente 60% de los municipios de los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Santanderes y Tolima (Minambiente, 2001)—.

USO DEL SUELO Y PROBLEMÁTICA

La presencia del hombre en los páramos se remonta a ocupaciones temporales de indígenas en el período prehispánico, pero fundamentalmente fueron adoptados con carácter mítico y religioso, y como corredores de paso. Durante la conquista, inicialmente fueron objeto de admiración, temor y dudas; pero ya en el siglo XVI surgen centros urbanos asociados a la producción agropecuaria en páramos (Reyes et

al., 2005). Actualmente, el 8% de las áreas con uso agropecuario en el país están en los páramos (Cepis, 2005) que corresponde aproximadamente al 20% del área total de páramos. La presencia de cultivos se presenta como un factor que modifica el equilibrio natural de ellos (Salamanca, 1986). El suelo del páramo bajo favorece el cultivo de papa, haba, cebada, cebolla y uyuco debido a la alta capacidad de retención de agua, la estructura granular, la porosidad fina, el calentamiento rápido del sol y el fácil manejo; hay buenas condiciones para la fotosíntesis y la cantidad de plagas es menor que en lugares más bajos (Mora-Osejo, 1995). Los monocultivos de papa se extienden por toda la cadena montañosa andina colombiana, práctica que requiere suplementos importantes de nutrientes y de plaguicidas (Suárez, 2005). Otras prácticas que afectan el equilibrio natural de los páramos son la quema y el pastoreo. La quema de la vegetación de páramo hace que la materia muerta desaparezca y aparezcan nuevos brotes; esta vegetación fresca es atractiva para el ganado. El pastoreo causa la compactación del suelo. Por otro lado, la quema acelera el proceso de descomposición y genera suelos más secos incrementando los niveles de temperaturas máximas (Domínguez, 1999).

MODELACIÓN DE BALANCES HÍDRICOS EN CUENCAS PARAMUNAS: CUENCA ALTA DEL RÍO BLANCO

Con el propósito de ilustrar la importancia de la precipitación horizontal en los páramos y la regulación hídrica que éstos ejercen en particular en relación con los caudales bajos de épocas de estiaje, se presenta en este trabajo la modelación del balance hídrico de la cuenca paramuna del río Blanco. Esta aproximación de modelación es fundamentalmente utilitarista en el sentido de que hace uso de (1) la herramienta computacional SWAT (AvSWAT 2000, embebido en ArcView para maximizar la discriminación espacial de información de suelos, cobertura vegetal, topografía, etc), aceptada en la comunidad hidrológica como un modelo lluvia – escorrentía con procesos y parámetros físicamente basados, útil para

análisis de escenarios de manejo de cuencas, y (2) un modelo simple para representar la precipitación horizontal (Navarrete, 2003; Navarrete y Díaz-Granados, 2004). Esta aproximación de modelación parte del supuesto de que SWAT puede ser adecuado para representar la mayoría de los procesos hidrológicos en cuencas de páramo, que éstos no son sustancialmente diferentes a los que ocurren en otros ambientes de cuencas (aunque algunos valores de parámetros si pueden variar notablemente) y que SWAT puede ser complementado para incluir procesos como la precipitación horizontal con un modelo externo cuyas series de tiempo puedan ser sumadas a las de precipitación vertical.

El río Blanco es una de las principales corrientes hídricas del Páramo de Chingaza, ubicado al este de Bogotá. En su parte alta está el denominado “Sistema Río Blanco”, que tiene como propósito la captación de agua de 26 cauces que contribuyen al “Sistema Chingaza” para el abastecimiento de agua para la ciudad de Bogotá. El Sistema Río Blanco capta un caudal promedio agregado de aproximadamente 1.95 m³/s, el cual es medido en 4 estaciones limnigráficas denominadas Pozo 1, Pozo 2, Pozo 3 y Pozo 4, ubicadas aguas arriba de los sitios de entrega al Sistema Chingaza.

Clima: La pluviosidad tiene un régimen monomodal, con valores medios multianuales que oscilan entre 1500 y 1700 mm, clasificándose como páramo semihúmedo. El período lluvioso está comprendido entre los meses de abril y septiembre, con máximas lluvias a mitad del año y con valores del orden de 200 a 250 mm/mes (ver Figura 1). La dinámica de la temperatura presenta un comportamiento bimodal inverso al de la precipitación, donde las temperaturas más bajas están relacionadas con los períodos lluviosos debido a que la mayor nubosidad limita la incidencia directa de la radiación solar. La temperatura media anual es de alrededor de 13°C.

El comportamiento de la humedad relativa sigue a un régimen inverso al de la temperatura con un valor

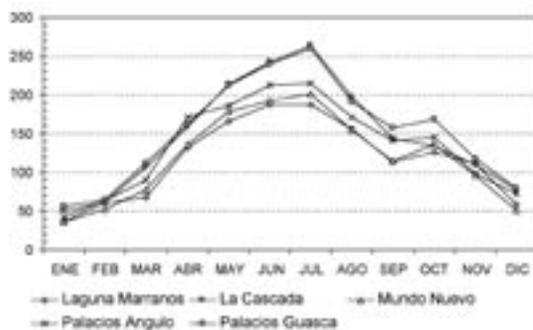


Figura 1. Precipitación mensual promedio (mm)

medio multianual de 82.5% y con valores máximos mensuales que llegan al 95% y mínimos mensuales que bajan hasta 65%.

Uso del Suelo: En la zona se identifican las siguientes unidades: a) Vegetación de páramo caracterizada por una cobertura vegetal dominada por gramíneas, frailejones y arbustos, con uso principal de protección y conservación; b) Bosque intervenido, constituido por vegetación arbórea con intervención antrópica; c) Arbustal Bajo que corresponde a un estrato arbustivo con altura inferior a 3 m; y d) Misceláneo conformado por gramíneas bajas fuertemente intervenidas (BetaAmbiental, 2000).

Suelos: Corresponden a dos tipos generales: a) Paisaje montañoso con una capa superficial de color negro y textura franco arenosa, un perfil inferior de textura arenosa franca con 68% de gravilla aproximadamente y sin estructura, seguida de otra capa con aproximadamente 30% de gravilla, y b) Suelos con capa superficial de textura franco arcillosa con 17% de gravilla aproximadamente, seguida de 3 capas con mayores contenidos de gravilla y, finalmente, un horizonte con textura arcillosa y sin estructura a 1 m de profundidad.

SWAT: La modelación hidrológica se basó en el modelo AvSWAT2000, versión de SWAT que constituye una extensión de Arcview 3.x. SWAT es un modelo físicamente basado, desarrollado para predecir el impacto de diferentes escenarios de manejo del suelo y de cobertura vegetal sobre el recurso hídrico. Es un

modelo de simulación continua a nivel diario del balance hídrico, basado en la ecuación de continuidad. AvSWAT divide la cuenca en subcuencas y éstas, a su vez, en áreas menores que se denominan unidades hidrológicas de respuesta (UHR), las cuales tienen su propio conjunto de parámetros de entrada y son analizadas individualmente.

La determinación de las subcuencas en el sistema del río Blanco se basó en un Modelo Digital de Terreno (DEM, por sus siglas en inglés) de 10 m de lado de pixel, generado a partir de información digital de curvas de nivel y redes de drenaje, además de un DEM de menor resolución derivado de imágenes de satélite. El DEM utilizado cubre un área de 123.1 km². El procesamiento geomorfológico de éste, incluyendo el incisado de la red hídrica, permitió la caracterización adecuada de las subcuencas tributarias a las estaciones limnigráficas, como se muestra en la Figura 2, con un total de 64 UHRs.

A partir de información secundaria de tipos de suelo, cobertura vegetal, geomorfología, unidades paisajís-

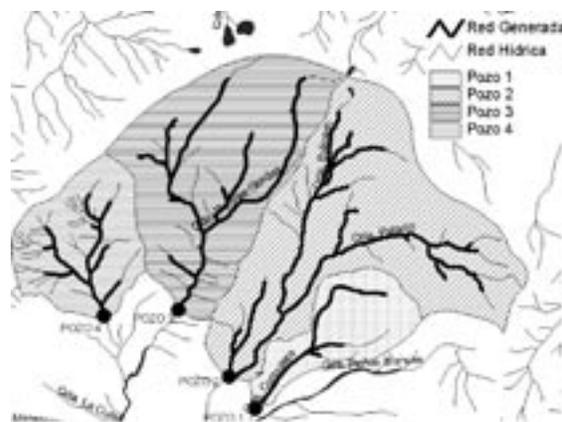


Figura 2. Cuenca del río Blanco

ticas y uso del suelo para el año 2000, se generaron los correspondientes mapas de cobertura vegetal y tipos de suelos. Se definieron 3 capas para el primer tipo de suelos y 5 capas para el segundo. Para cada una de estas capas se definieron valores para los siguientes parámetros: a) Grupo Hidrológico de suelo

según clasificación SCS, b) Máxima profundidad de raíces, c) Profundidad del suelo, d) Densidad aparente, e) Agua disponible para la vegetación, f) Conductividad hidráulica saturada, g) Contenido de carbono orgánico, arcillas, limos, arenas y gravas, h) Albedo de suelo húmedo y h) Factor de erodabilidad del suelo según la USLE (Ecuación universal de pérdidas de suelo). Para la cobertura vegetal se definieron los siguientes parámetros: a) Máxima profundidad de raíces, b) Factor C de cubrimiento vegetal según la USLE y c) Número de curva de escorrentía CN para la condición II de humedad antecedente, según clasificación del SCS.

Las variables climatológicas requeridas por SWAT consisten en la precipitación diaria, temperaturas máxima y mínima diarias del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Se utilizó información registrada a nivel diario en diferentes estaciones hidroclimatológicas disponibles en el área. A partir del análisis de continuidad, concurrencia y calidad de la información, se seleccionó el periodo de 7 años comprendido entre enero de 1978 y diciembre de 1984, como periodo de modelación.

Modelo de Precipitación Horizontal: De acuerdo con la revisión de Sáenz (2001), Merriam (1973) propone un modelo conceptual para su representación, definido como $F = wutE/\rho$, que estima el flujo uniforme de humedad F por unidad de área, que es interceptado por un árbol aislado en función de la distribución uniforme del contenido de agua líquida atmosférica w , la velocidad del viento u , el tiempo de exposición t , un factor de eficiencia de captación E y la densidad del agua ρ . Los valores

usados por Merriam son $w = 0.35 \text{ g/m}^3$, $u = 2 \text{ m/s}$ y $E = 0.04$. En este trabajo se adoptó un modelo de precipitación horizontal con la misma estructura del modelo de Merriam, pero involucrando la topografía del terreno, el contenido de humedad atmosférica y la velocidad y dirección del viento y considerando que la precipitación horizontal no incide de manera homogénea sobre el área, sino que es función de la elevación de la base de la nube que transporta humedad y de la velocidad y dirección con la cual la masa húmeda incide sobre el área. El modelo propuesto es:

$$(1) \quad PH = wutEC_e C_a \cdot K$$

donde PH es la precipitación horizontal, C_e es un coeficiente de elevación e incidencia que tiene en cuenta la elevación de la base de las nubes y la dirección de incidencia de éstas, C_a es un coeficiente de altura que permite distribuir la precipitación horizontal con la altura y K una constante de calibración. La elevación de la base de la nube incidente se estima con la tasa adiabática seca Γ y la tasa pseudoadiabática saturada Γ^* , de acuerdo con la Ecuación 2:

$$(2) \quad Z_s = Z_{est} + \frac{T_a - T_d}{G - G^*}$$

donde Z_s es la elevación del nivel de saturación, Z_{est} es la elevación de la estación climatológica, T_a es la temperatura del aire y T_d la temperatura de punto de rocío, medidas en la estación. Considerando el ciclo diario de temperatura, Z_s se calculó como un promedio ponderado de elevaciones estimadas con

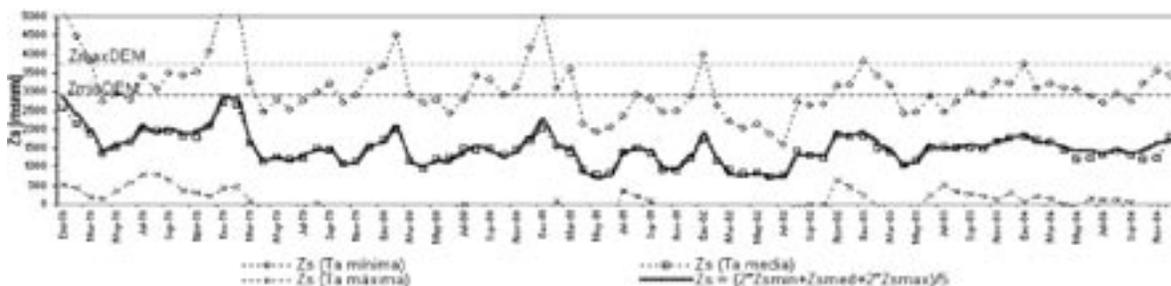


Figura 3 Elevación nivel de condensación

los valores diarios de temperatura máxima, media y mínima y humedad relativa diaria, dándole el doble de peso a aquellos valores calculados con las temperaturas máxima y mínima, representativas de la oscilación intradiurna de temperatura predominante en los páramos. En la Figura 3 se presentan las series generadas de niveles de saturación, donde se observa que todo el tiempo se encuentra por debajo de la altura máxima de las cuencas, por lo cual podría concluirse la alta permanencia de nubosidad y eventualmente de precipitación horizontal en las subcuencas de estudio.

Teniendo en cuenta la forma de la cuenca alta del río Blanco, se considera que las masas de aire húmedo que generan precipitación horizontal inciden desde las direcciones N, NE y NW. Además, la forma y magnitud de las áreas con neblina incidente cambian en función de Z_s . El coeficiente C_s se define como el porcentaje del área expuesta para cada dirección de viento de acuerdo con la elevación de Z_s en cada día, el cual fue estimado para cada una de estas direcciones en función de la elevación de la base de las nubes.

Calibración: El modelo fue calibrado utilizando los registros de caudales diarios de las estaciones hidrométricas Pozo1, Pozo2 y Pozo3. Se utilizó el método de aproximaciones sucesivas considerando la complejidad de implementar un método automático de calibración. El periodo de análisis se dividió en 3 porciones: a) De enero a diciembre de 1978 se utilizó para el calentamiento del modelo con el fin de mini-

mizar los efectos de las condiciones iniciales; b) De enero de 1979 a diciembre de 1983 para calibración, y c) De enero a diciembre de 1984 para verificación. Para la calibración se tuvo en cuenta la experiencia de Domínguez (1999) con SWAT. El modelo se calibró y verificó fundamentalmente con base en los valores de los parámetros de conductividad saturada, densidad aparente, número de curva y relación entre precipitación horizontal y precipitación vertical. Debe resaltarse que, para este último parámetro, un valor del 18% representa el mejor ajuste obtenido, como se muestra en la Figura 4 para los caudales mensuales multianuales; éstos junto con los caudales mensuales muestran una ligera sobreestimación en los periodos secos y un ajuste confiable de los altos, manteniendo una media sin error apreciable.

Los diagramas de Box-Whiskers indican distribuciones de valores modelados mensuales menos dispersas que las registradas, con valores medios que conservan el régimen monomodal de manera suavizada.

Análisis de escenarios: Con el propósito de cuantificar de una manera aproximada el efecto de diferentes planes de manejo se plantearon escenarios hipotéticos que parten de la condición actual de uso del suelo (Suárez, 2005). Un escenario de recuperación de la cuenca corresponde por ejemplo a uno en el que la vegetación de páramo permanece igual y las áreas de pastizales se suceden por arbustos bajos. Un escenario de degradación de la cuenca sería aquel en el que la vegetación de páramo es intervenida desapareciendo y generando áreas de bosques interveni-

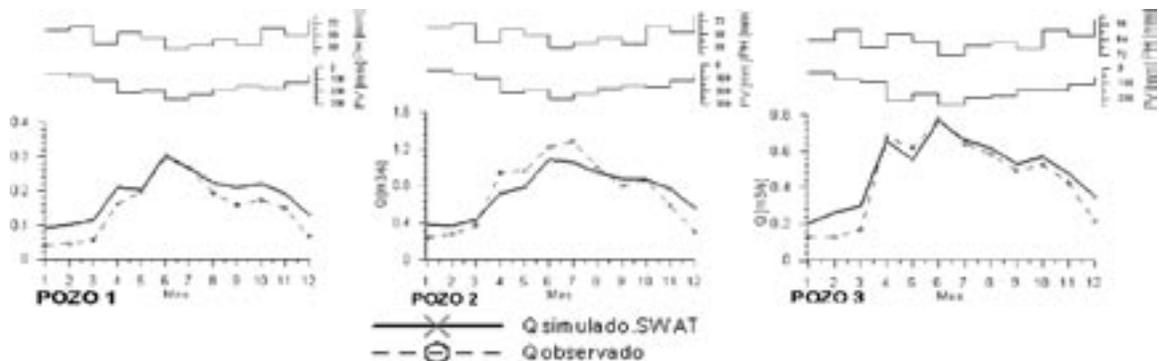


Figura 4 Caudal mensual multianual

dos (éstos aumentan a 50%), la vegetación arbustal se convierte en pastizales (éstos se incrementan a 30%) y parte del bosque intervenido pasa a zonas de arbustos de menor tamaño (20% del área total). Este escenario también conllevaría impactos importantes en la eficiencia de intercepción de la precipitación horizontal y cambios en características de suelos de páramo (incremento en densidad aparente, reducción de la conductividad hidráulica por compactación). Los resultados de la modelación de este escenario de degradación, los cuales hay que considerarlos una aproximación gruesa, indican que habría una reducción potencial del 16.5% de la escurrimiento media multianual con respecto a la situación actual, valor que señalaría la importancia de la vegetación de páramo en la eficiencia de intercepción de precipitación horizontal y su sinergia con las características hidráulicas de los suelos no intervenidos. A nivel mensual se observa que los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, representativos de períodos secos, muestran un porcentaje potencial de reducción de escurrimiento promedio en la cuenca del orden del 23%, siendo enero el mes de mayor incidencia con un valor promedio en la cuenca de 28%, y en el caso de la subcuenca de Pozo 4 con un valor cercano a 40%. Estas cifras estarían cuantificando efectivamente el efecto regulador del sistema atmósfera-suelo-plantas de ambientes de páramo.

Comentarios sobre la modelación del balance hídrico:

El procedimiento de modelación implementado resultó en un ajuste relativamente satisfactorio del comportamiento hídrico de la cuenca alta del río Blanco, utilizando valores calibrados de parámetros dentro de rangos físicamente representativos de hidrosistemas de páramo. La cantidad total de precipitación horizontal estimada equivalente a un 18% de la precipitación vertical. Este porcentaje resulta consistente con las mediciones realizadas en Costa Rica (Dorewend, 1979; citado por Bruijnzeel y Proctor, 1973).

La aproximación de modelación de la precipitación horizontal presentada, en la cual se consideran para

su estimación los efectos topográficos y el comportamiento de las masas de humedad atmosférica, parece ser adecuada para la cuantificación de este importante proceso característico de los páramos.

La importancia hídrica de la precipitación horizontal en los hidrosistemas de páramo y su interacción con los sistemas suelo-vegetación que este trabajo busca contribuir a evidenciar, ojalá contribuya a generar programas de instrumentación, monitoreo y análisis específicos en los países andinos y en particular en Colombia para mejorar el conocimiento del comportamiento hídrico de estos ecosistemas, a desarrollar herramientas confiables de simulación y a analizar cuantitativamente diferentes escenarios de manejo. En la Universidad de los Andes, además de la modelación matemática de estos hidrosistemas, se ha construido un simulador de neblina con el propósito de calibrar paneles de medición de precipitación horizontal y su correlación con la intercepción de neblina por parte de las diferentes especies vegetales de páramo.

PROTECCIÓN DE LOS PÁRAMOS

Los páramos son ecosistemas sensibles que están expuestos a algunas actividades antrópicas inadecuadas dentro de las cuales están la ganadería extensiva, la deforestación, la agricultura —principalmente el cultivo de papa—, la explotación de canteras, la cacería, actividades relacionadas con el orden público, la presencia de cultivos ilícitos y la construcción de vías. De aproximadamente 66 páramos colombianos, hasta 2001 sólo 16 están protegidos por Parques Nacionales Naturales, los cuales representan algo menos del 39%, siendo los más representativos Sumapaz, Cocuy y Sierra Nevada de Santa Marta (Minambiente, 2001). Recientemente el proyecto de ley para la protección de las zonas de páramo, bosques de niebla y estrellas hídricas y fluviales ha sido aprobado por la comisión Quinta del Senado de la República y hacía trámite a segundo debate para darle a las autoridades ambientales del orden nacional, departamental y municipal, los recursos económicos

necesarios para la recuperación o compra de este tipo de zonas naturales para su preservación.

Este trabajo pretende resaltar la importancia de los hidrosistemas de páramo como reguladores muy eficaces pero a la vez muy sensibles de los caudales aguas abajo, en particular los asociados con épocas de estiaje. Por lo tanto, este trabajo insta a propender por un mejor conocimiento del funcionamiento de estos ecosistemas y así proporcionar elementos de juicio objetivos a quienes de una u otra forma participan y toman decisiones para su uso, preservación, restauración y manejo sostenible.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece la participación y colaboración en el estudio de hidrología de páramos a estudiantes de pregrado y posgrado del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes entre quienes están Francina Domínguez, Juan A. Sáenz, William Clavijo, Andrés Tamayo, Benito Calvano, Daniel Céspedes, Diego García y Carlos Quijano.

REFERENCIAS

- BetaAmbiental. 2000.
Plan de manejo Ambiental Indicativo para el Sistema Río Blanco.
Bogotá.
- Bruijnzeel, L. A. y Hamilton, L.S. 2000.
“Decision time for cloud forests”,
Water related issues and problems of humid tropics and other warm humid regions, WWF, IHP, IUCN.
- Bruijnzeel L. A. y Proctor J. 1993.
“Hydrology and Biogeochemistry of Tropical Montane Cloud Forest: What Do We Really Know?”.
En: Tropical Montane Cloud Forests: Proceedings of an International Symposium. Hamilton, L. O. J. Juvik y F. N. Scatena (editores), Hawaii: East-West Center, pp. 25-26.
- Cavelier, J. y Goldstein, G. 1989.
“Mist and Fog Interception in Elfin Cloud Forests in Colombia and Venezuela”.
En Journal of Tropical Ecology, (5), pp. 309-322.
- Cepis. 2005.
<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/analisis/colombias/spcapit10.html>.
- Domínguez, D. F. 1999.
Hidrología de Páramos, Modelación de la cuenca alta del río Blanco.
Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,
- Guhl, E. 1982.
“Los Páramos circundantes de la Sabana de Bogotá. Su Ecología y su Importancia para el Régimen Hidrológico de la misma”.
En Colloquium Geographicum 9: pp.195-212.
- Hofstede, R. G. M. y Sevink, J. 1995.
Effects of Burning and Grazing on a Colombian Paramo Ecosystem.
Amsterdam, Universitet van Amsterdam. Tesis de PhD. 198 pp.
- Hofstede, R. G. M. 1997.
“La importancia Hídrica del Páramo y aspectos de su manejo”.
1^{er} Páramo Electrónico Forum, CONDESAN.
- IDEAM. 2002.
Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor.
- Juvik, J. O. y Nullet, D., 1993,
Relationship Between Rainfall, Cloud-Water Interception, and Canopy Throughfall in the Hawaiian Montane Forests.
En Tropical Montane Cloud Forests: Proceedings of an International Symposium. Hamilton, L. S. O. J. Juvik y F. N. Scatena (editores). Hawaii: East-West Center. pp. 102-141.

- Kerfoot, O.** 1969.
 “Mist Precipitation on Vegetation”.
Wn Forestry Abstracts 29(11), pp 8-20.
- Luteyn, J. L.** 1999.
 “Introduction to the Páramo ecosystem”.
En Páramos: A checklist of plant diversity. New York: Geographical distribution and Botanical literature mem. Bot. Gard. Vol.84.
- Merriam, R.A.** 1973,
 “Fog Drip from Artificial Leaves in a Fog Wind Tunnel”.
En Water Resources Research, Vol.9, No. 6.
- Ministerio del Medio Ambiente.** 2001.
Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de Alta Montaña: Páramos.
- Ministerio del Medio Ambiente.**
 2005. “Lineamientos de Política para el Manejo Integral del Agua”,
http://www.col.ops-oms.org/diaa/2002/MINAMB_lineamientos.htm#775.
- Montoya, A. H. y Díaz-Granados, M.** 1998.
Efecto de la Cobertura Vegetal en la Respuesta Hidrológica de Cuencas Hidrográficas.
 XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Cali, Colombia.
- Mora-Osejo, L. E., Becerra N., Coba, B.** 1995.
 “Anatomía Foliar de Plantas de Páramo”.
En Estudios Ecológicos del Páramo y del Bosque Altoandino, Cordillera Oriental de Colombia. Mora-Osejo, L. E., Strum, H. (ed.). Bogotá. Colombia: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Navarrete, J. D.** 2003.
Hidrología de Páramos. Modelación de la Cuenca Alta del Río Blanco con AvSWAT2000.
 Universidad de los Andes, Dpto de Ingeniería Civil y Ambiental, Tesis de Maestría.
- Navarrete, J. D. y M. Díaz-Granados.** 2004.
 “Modelación de Hidrosistemas de Páramo”,
 XVI Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Armenia, Octubre de 2004 y XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Pedro, Brasil.
- Reyes, P., J. Molano, F. González, A. Cortés, O. Rangel, A. Flórez, P. Iriarte, E. Graus.** 2005.
 “El Páramo: Ecosistema de Alta montaña”,
 Biblioteca Virtual Banco de la República, <http://www.banrep.gov.co/blaavirtual>.
- Sáenz, J. A.** 2001
 “Modelo computacional de hidrología de Páramos”.
 Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Tesis de Magíster.
- Sáenz, J. A., Domínguez, F. y Díaz-Granados M. A.** 2001.
 “Needs in the quantification of Páramo ecosystems hydrology - Applicable model proposal”.
En Twenty First Annual American Geophysical Union Hydrology Days. Ed. Jorge A. Ramírez.
- Salamanca, S.** 1986.
 “La vegetación del Páramo, Única en el Mundo”.
En: Colombia, sus Gentes y Regiones. Vol 2.
- Schemenauer, R. S. y Cereceda, P.** 1994.
 “A Proposed Standard Fog Collector for use in High-Elevation Regions”.
En Journal of Applied Meteorology, Vol.33. No.11.
- Suárez, L.** 1989.
 “El Páramo. Características Ecológicas”.
En: Revista Geográfica. Instituto Geográfico Militar. Quito, Ecuador.

Suárez, T. 2005

“Impacto del Cambio del Uso de la Tierra en la Respuesta Hidrológica de un Ecosistema de Páramo”.

Universidad de los Andes, Dpto de Ingeniería Civil y Ambiental, Tesis de Pregrado.

Universidad de los Andes. 2002.

Balance Hídrico en Cuencas Paramunas,
UNESCO, Proyecto UCOL 00610

Verweij, P.J. 1995.

Spatial and temporal modelling of vegetation patterns.

Ámsterdam: The Netherlands. Centre for Geo-Ecological Research, IGC.

Vogelmann, H. W. 1973.

“Fog Precipitation in the Cloud Forests of Eastern Mexico”.
En BioScience. 23(2). pp 96-100.

Weber, H. 1959.

Los Páramos de Costa Rica y su concatenación fitogeográfica con los Andes Suramericanos.
Ministerio de Obras Públicas. Instituto geográfico de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Zadroga, F. 1981.

“The Hydrological Importance of a Montane Cloud Forests Area of Costa Rica”.
En Tropical Agricultural Hydrology. Lal, R. y E. W. Rusell (editores).

