

Análisis de sensibilidad del impacto del cambio del uso de la tierra en procesos hidrológicos usando Sistemas de Información Geográfica
Mauricio Rincón - King's College London

Resumen

Una de las principales causas en el cambio del uso de la tierra en los bosques tropicales es la presión que ejerce el hombre, sin tener en cuenta las devastadoras consecuencias sobre los recursos naturales como lo son la calidad del agua, pérdida de especies en biodiversidad, cambio en el clima o en la estabilidad del ecosistema (Koning et al. 1998). Deforestación en los bosques tropicales de niebla es una de las actividades que en las últimas décadas conocida como una de las principales actividades modificadoras del paisaje. El impacto de la deforestación es estudiado, haciendo uso de las propiedades físicas del ciclo hidrológico en la cuenca del Río el Tambito. Un modelo hidrológico dinámico superficial operando sobre Sistemas de Información Geográfica (SIG) es diseñado para la zona de estudio, el cual es usado para analizar las variaciones hidrológicas frente al cambio del uso de la tierra. El modelo incluye la simulación de los eventos como: radiación solar y balance energético, evaporación, interceptación y precipitación real, infiltración, balance hídrico del suelo, escorrentía y flujo superficial, recarga y erosión. La información básica para el modelo es capturada con 3 estaciones hidro-meteorológicas instaladas en sitios experimentales en la cuenca complementado con muestreo de campo. Una breve descripción del experimento es presentada junto con la metodología, procedimientos de campo e implementación del modelo. 15 consecutivos escenarios en SIG son usados en la modelación del cambio del uso de la tierra en el análisis. Preliminares resultados del análisis de sensibilidad sobre los procesos hidrológicos modelados en 1 y 2.5 dimensiones son presentados.

Introducción

De 1200 millones de hectareas (has) en bosque tropical que existían en la tierra en 1988, cerca de 3600 millones de has era en bosque tropical húmedo y de niebla, de los cuales el 40% se localizaba en Latino America (Park, 1992). FAO reporta que aproximadamente 15 millones de has en bosque desaparecen anualmente (FAO, 1991), en los procesos de conversión de tierras para la agricultura y explotación económica en maderas. De mantenerse este ritmo de deforestación, dentro de 30 o 40 años estos bosques solo existiran en el recuerdo.

Cambios en la cobertura de la tierra, cambios en el paisaje y cambios en el uso del suelo producen alteraciones en los ciclos hidrológicos en todas las escalas. Propiedades físicas en estos procesos tienen su consecuente alteración. Los cambios en escorrentía superficial y erosión son examinados en este estudio, por medio de variaciones en la cobertura vegetal, el cual es dado por el uso de diferentes coberturas de paisajes. Un modelo hidrológico superficial es diseñado para simular los procesos hidrológicos en un área de estudio. Usando la modelación en SIG, se aplica a un año de simulación horaria y se repite el proceso para 15 diferentes escenarios consecutivos de cambios de uso de la tierra, de los cuales los resultados son evaluados por medio de análisis de sensibilidad.

Objetivo

Investigar el impacto que tiene el cambio del uso de la tierra sobre el ciclo hidrológico en los bosques tropicales de niebla en laderas, haciendo uso de las propiedades físicas en hidrología con aplicaciones en SIG. Mostrar el rendimiento del modelo convencional (1D) y el modelo dinámico superficial (2.5D).

Metodología

La estimación del impacto al cambio del uso de la tierra (CUT) es abordado por las variaciones en los componentes del ciclo hidrológico en las dos cuencas en la reserva el Tambito (Cauca), haciendo uso de un modelo hidrológico diseñado para esta investigación, el cual simula hora a hora la interacción entre los flujos del ciclo hidrológico a lo largo de un año. El CUT es incluido en la simulación por medio de cambios de escenarios de CUT anualmente. Las variaciones en área de los usos para cada período fueron generados por el modelo de CUT en celular automático para la región del Dr. Mulligan (1999) (fig. 1). La simulación en el modelo hidrológico se repite inicialmente 15 veces cambiando secuencialmente la cobertura de uso de la tierra. Valores anuales de los flujos en los diferentes estados son analizados para los 15 años simulados. Dos aspectos en el modelo son comparados; uno es un modelo convencional (1D) que maneja los flujos en dirección vertical y otro es el mismo modelo pero incluyendo rutinas de distribución superficial (2.5D).

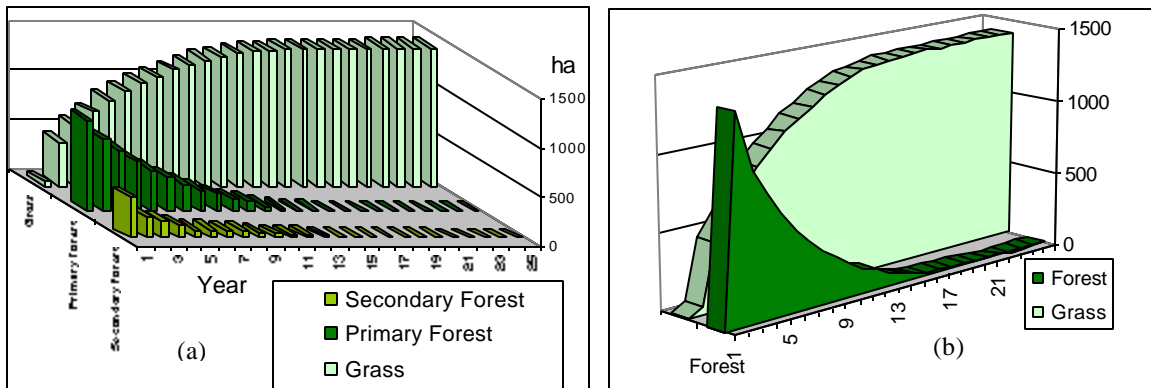


Fig. 1. Variación del uso de la tierra anual (Mulligan model, 1999)

La zona de estudio es la Reserva Biológica el Tambito en la cordillera Occidental, Cauca – Colombia (fig. 2). En la reserva se demarcan dos cuencas a saber: la cuenca del río Tambito y la cuenca del río Palo Verde. Tiene un rango de elevación entre 1400 y 2800 msnm. Su localización geográfica es al sur-oeste de Colombia, distando aproximadamente 75 km de la costa pacífica. Sus características geomorfológicas dan al paisaje montañas empinadas de altas y largas pendientes con gran variedad de orientaciones. La

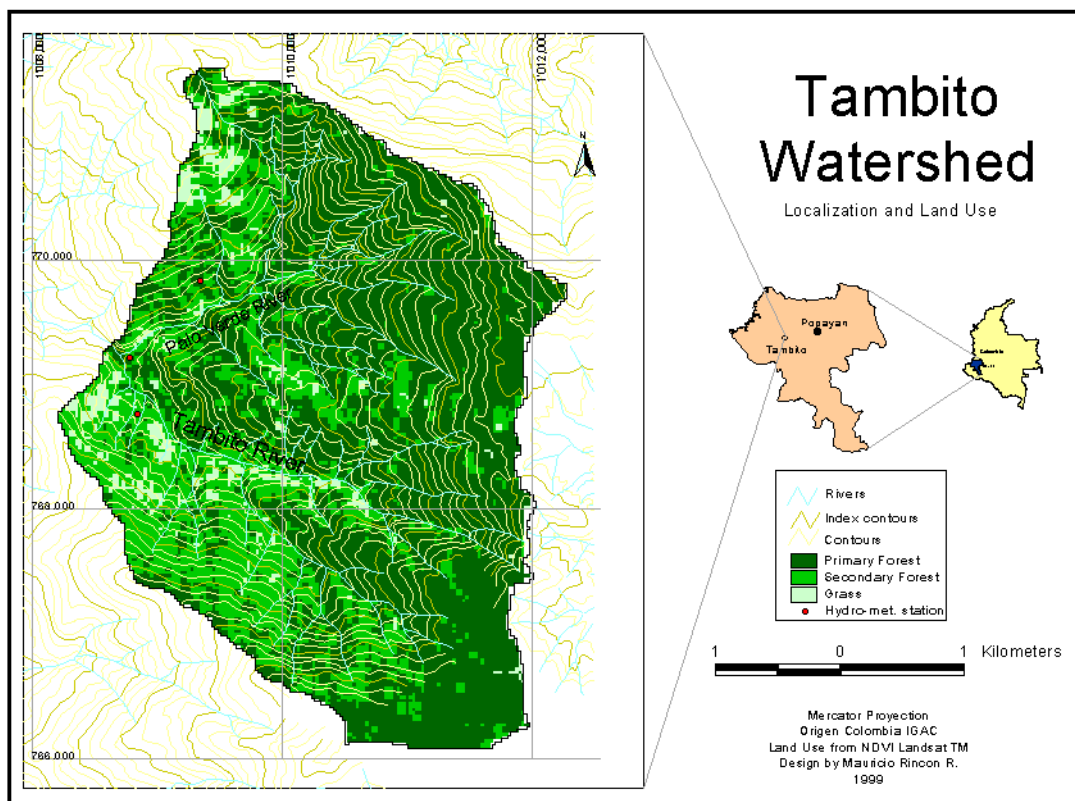


Fig. 2. Localización y uso de la tierra en Tambito

vegetación es propia de los bosques tropicales húmedos de montaña con acentuada biodiversidad en especies endémicas vegetales, animales mamíferos y reptiles. Las dos cuencas cubren un área aproximada de 1500 has, de la cual cerca del 95% está cubierta de bosque de niebla y el resto son parches aislados de pasturas, en ocasiones temporales hechas por los colonos. La temperatura promedio es de 19°C con picos que alcanzan los 24°C a medio día a los 12°C en horas de madrugada. Tiene un régimen de lluvia de más de 4000 mm al año. Las lluvias se mantienen la mayor parte del año, pero existe un período de baja precipitación en los meses de Julio y Agosto. Las intensidades de lluvia son muy variadas, en ocasiones pueden llegar a 80 mm / hora. Tiene una hidrología muy diversa, con muchos riachuelos permanentes durante todo el año.

Para alcanzar el objetivo la investigación se demarca en 3 estados:

- 1- Actividad de campo y compilación de información
- 2- Modelación
- 3- Análisis de resultados

1 - Actividad de campo y compilación de información

A través de la información compilada como cartografía, fotografía aérea e imágenes de satélite complementado con la visita a campo, se diferenciaron 3 tipos de usos: bosque primario, bosque secundario y pastos (fig. 2). Para estos 3 usos se diseñó el experimento (fig. 1a).

En tres diferentes sitios del área de estudio cada uno perteneciente a la clasificación de uso del suelo, se instalaron estaciones hidro-meteorológicas (fig. 2) para coleccionar información que es usada en el modelo en validación. En estos mismos sitios se demarcaron parcelas experimentales de 2m de frente por 10 m de profundidad en dirección de la pendiente hacia arriba. Adicionalmente, en estas parcelas se instalaron instrumentos para capturar información hidrológica como también para estimar propiedades físicas propias del uso; esta información es almacenada en el data logger de cada estación.

Descripción de las estaciones hidro-meteorológicas:

Las estaciones coleccionan información de todos los sensores cada 15 min dando el promedio y la desviación estandar horaria, y para el caso de los eventos espontáneos éstos son registrados en el momento de su ocurrencia. Los sensores de las estaciones son dispuestos de acuerdo a la localización o el uso del suelo. Los instrumentos y sensores para cada una de las estaciones son los siguientes:

- *Estación de la parcela en pasto.* La información que esta estación colecciona es: Radiación solar recibida y reflejada, radiación de infra-rojo lejano recibida y reflejada, radiación reflejada en la banda azul, radiación fotosintética activa reflejada, humedad relativa, temperatura húmeda y seca, temperatura del aire, lluvia, escorrentía superficial, flujo lateral en el suelo, erosión, temperatura y potencial matricial del suelo a 40, 80 y 120 cms de profundidad (fig.3 y 4).
- *Estación en el bosque primario.* Adicional a los mismo instrumentos de la estación de pasto, esta cuenta con: colector de lluvia a través del follaje de 6 por 10 mts, colector de deposición de agua de nubes sobre epífitas de 0.8 por 4 mts., drenaje de epífitas y drenaje por los troncos de los árboles.
- *Estación del bosque secundario.* Cuenta con algunos sensores similares a los del bosque primario, pero adicional a estos, aprovechando su cercanía a las desembocaduras de los ríos, datos de los ríos son coleccionados, como: descarga de los ríos Palo Verde y Tambito, concentración de sedimentos en las aguas de los ríos, radiación fotosintética activa a tres diferentes alturas, 2, 4, 6 metros.

Gran parte de esta información es usada en la parametrización del modelo, otra parte es usada en comparación del rendimiento del modelo, evaluación y posteriormente en validación.



Fig 3 Estación en la parcela en pasto



Fig. 4 Colectores de escorrentía y filtración lateral

Inconvenientes en campo y problemas de humedad en las estaciones hicieron que la recolección de información fuera en períodos aislados. El cuadro 1 muestra los períodos en que la información ha sido colectada.

	1997	1998
Parcela en pasto	Oct 31/97 a Ene 31/98	Julio 28 a Nov 30
Bosque primario		Agosto 8 a Agosto 12
Bosque secundario y río		Agosto 9 a Agosto 21

Cuadro 1. Períodos de colección de información

Gráficas de algunas de las informaciones capturadas se pueden ver en el anexo1. Estas gráficas muestran un período de recolección de 140 días en resúmenes diarios del 17 de Septiembre de 1997 al 1 de Febrero de 1998. La figura A1-1 muestra la precipitación registrada, en donde los primeros 50 días no se presentó lluvia; posteriormente se dieron lluvias normales de hasta 55 mm diarios. La figura A1-2 enseña el comportamiento de la temperatura tanto húmeda como seca. La figura A1-3 muestra la variabilidad en la incidencia de radiación solar. Esta variabilidad en gran parte es debida a la dinámica de las nubes en la zona.

Con base en la cartografía existente y un mapa de usos creado por la 'Fundación Proselva', se hizo una estratificación para coleccionar la información correspondiente al uso-vegetación y suelos. 25 clases son diferenciadas de las cuales 18 fueron muestradas en suelos. Vegetación de cada uso fue colectada para estimar sus propiedades que involucran los parámetros de uso en el modelo (fig. 5). El análisis de laboratorio mostró que la predominancia de los suelos en Tambito es de suelos franco-arcilloso-arenoso y franco arenoso. Las proporciones en cuanto a textura del suelo son: arena 57.027%, limos 21.23% y arcillas 21.80%. La proporción de materia orgánica para los primeros 20 cms de profundidad es de 14.4 %.

La similitud en los parámetros de la vegetación entre los bosques primario y secundario indujeron a unificar las clases de uso y simplificar para el análisis a 2 clases que son bosque y pastos. La distribución de áreas y proporcionalidad de cambio usadas en el modelo se presenta en la fig 1b.

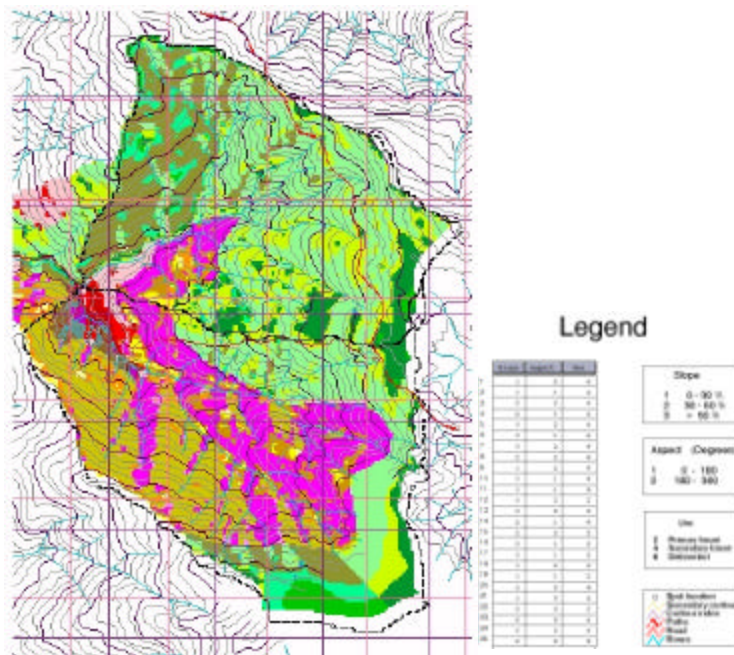


Fig. 5 Clasificación para muestreo de suelos

2- Modelación

El modelo inicialmente es implementado en escala de 1D dimensión por parcela, operando sobre una hoja electrónica, para parametrizar los submodelos. Posteriormente las mismas rutinas son implementadas en 2.5D dimensiones como modelos espacial. Se adicionan componentes de dispersión espacial para el manejo superficial. La unidad de tiempo usada dentro del modelo es de 1 hora. Todas las rutinas son regidas por este intervalo, reajustando todos los valores horariamente.

Modulos y características del modelo:

Inicialmente cuenta con un submodulo balance energético y de radiación solar que opera con el movimiento de la tierra y la posición de la zona de estudio sobre el globo, calculado horariamente la cantidad de energía incidente sobre la superficie de la tierra, teniendo en cuenta la posición y disposición de cada punto sobre la superficie (pendiente y aspecto). Posteriormente, se modela la atenuación de la energía incidente debida a efectos atmosféricos, dispersión por partículas en el aire y efectos de los gases y las moléculas de agua en las nubes. Con base en lo anterior se estima la cantidad de energía disponible para evaporación, la cual es usada por el módulo de evaporación, estimando la cantidad potencial evaporativa de acuerdo a las condiciones existentes.

Con base en registros de precipitación locales de las estaciones instaladas y de las estaciones cercanas a la zona de estudio, los valores de precipitación horaria han sido estimados preliminarmente para un año con Patter model (Mulligan, 1996), para modelar usando un año entero de registros de lluvia. El submodelo de interceptación determina la cantidad de agua lluvia que es capturada por la vegetación, la que se pierde por evaporación en el canopy y la cantidad de lluvia que alcanza el suelo. Los parámetros de vegetación derivados del muestreo de vegetación hecho en las campañas de campo son usados en esta sección.

De la lluvia real que llega al suelo, por medio del submódulo de infiltración se estima cuanta de esta lluvia penetra el suelo como infiltración y cuanta de ésta se queda en la superficie. La infiltración es calculada haciendo uso de las propiedades físicas del suelo y de las características del movimiento del agua en el suelo. Una función Pedón-transferencia es usada (Saxton et al., 1986), que estima los valores de conductividad de agua en el suelo y las dependencias físicas de esta con el potencial matricial, capilaridad y

conductividad. Estos valores son calculados para cada intervalo de tiempo dentro del modelo, reajustando todas las propiedades hidráulicas del suelo. Así mismo los valores de recarga al flujo principal o a la cama de rocas y humedad del suelo son estimados.

Del agua superficial que no alcanzó a penetrar en el suelo, el submodelo de escorrentía estima cuanto de ese flujo permanece en la superficie, o se mueve superficialmente produciendo el flujo superficial (escorrentía), del cual con sus propiedades físicas son usadas para calcular la cantidad de erosión. El diagrama general del modelo se presenta en la fig. 6.

El modelo en 2.5D dimensiones opera sobre la base de celdas cuadradas de 25 metros de lado cubriendo un área aproximada de 6 km². El movimiento superficial de flujo es implementado en el proceso de escorrentía, que es uno de los principales eventos dentro del modelo. Propiedades físicas del flujo son incluidas en el intercambio superficial entre celdas.

Gráficas que muestran el comportamiento de los flujos dentro del modelo pueden ser vistas en el anexo 2. Estas figuras son el resultado del promedio general de las cuencas, valores por m² del modelo de flujo vertical (1D) sin ningún intercambio de flujo superficial. Un año de simulación es presentado. La fig A2-1 presenta la evaporación del canopy (en mm por hora) comparada con la precipitación. La máxima evaporación alcanzada es de 1.5 mm. La fig A2-2 muestra como la conductividad hidráulica del suelo cambia con el contenido de humedad. Comparada con la precipitación, los dos eventos guardan una relación estrecha, regulando las propiedades físicas hidráulicas del suelo. De la misma forma, la fig A2-3 muestra la variación de la humedad del suelo. Notese que después de los eventos de precipitación, la humedad del suelo se incrementa y continúa así mientras existe infiltración; posteriormente, la humedad decrece por recarga y evaporación. En la fig. A2-4 se presenta el comportamiento del potencial matricial del suelo, guardando estrecha relación con los otros eventos mencionados. La fig. A2-5 muestra como el agua escorrentía superficial es acumulada y disminuye gradualmente por infiltración y evaporación. Esta escorrentía genera los valores de erosión presentados en la fig. A2.6. Notese en comparación con las dos últimas figuras que para unos de los eventos extremos de escorrentía (200 mm / h) la respuesta de la erosión generada (60 mm / h).

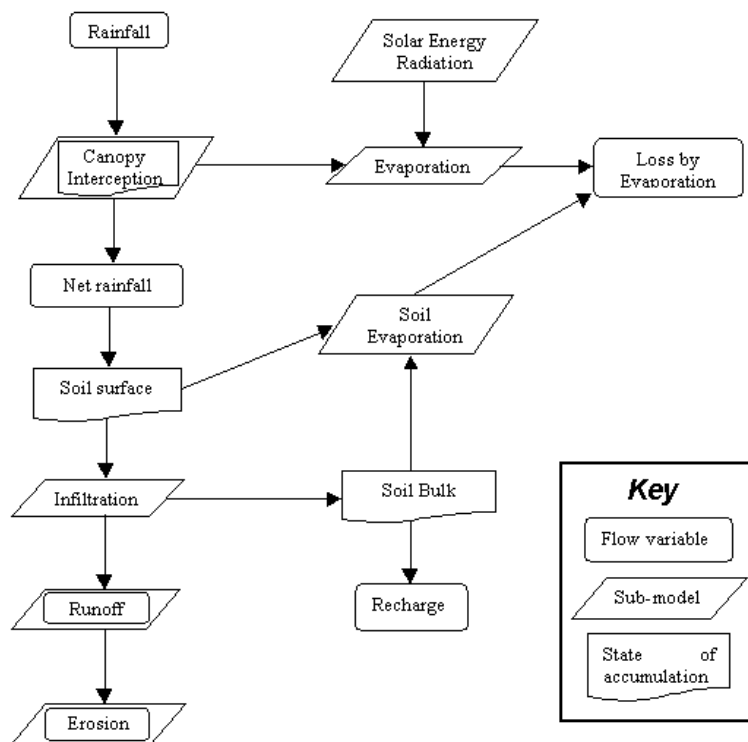


Fig. 6 Diagrama general del modelo

3- Planteamiento del ejercicio, resultados preliminares y análisis

La incorporación del componente espacial superficial en el modelo, marca una notable diferencia en el comportamiento hidrológico de la cuenca. El anexo 3 presenta una comparación gráficamente de los cambios del rendimiento del modelo. Las variables evaporación, interceptión, infiltración, escorrentía superficial y erosión son comparadas entre las dos aproximaciones dadas por los modelos a través de los 15 años de simulación, en valores anuales promedios por m^2 . Evaporación e interceptión presentan un decremento muy similar en los dos modelos (1D y 2.5D) siguiendo el patrón de CUT (fig 1). Infiltración se duplica en el modelo 2.5D con relación a 1D. El comportamiento de escorrentía superficial y erosión es inverso comparado entre los dos tipos de modelos y en cuanto al rendimiento son significativamente diferentes.

El análisis de sensibilidad fue desarrollado para las mismas variables y los mismos modelos. La sensibilidad al CUT es la proporción de cambio de cada variable con respecto a la proporción del cambio del área entre períodos (de año a año). La sensibilidad al CUT es muy similar en los dos modelos para las variables de evaporación e interceptión (ver figuras anexo 3). En infiltración, la sensibilidad aunque tiene el mismo sentido en los dos modelos, la magnitud de ellas es muy diferente; en 1D es mas sensible.

El notorio cambio en sensibilidad al CUT en escorrentía superficial y erosión, expresan la significancia del componente superficial en el modelo 2.5D. Existe grandes variaciones de sensibilidad entre un año y otro para las dos variables en mención, y estas variaciones son oscilatorias, se incrementan o disminuyen en diferentes períodos. En escorrentía superficial, la sensibilidad tiene tendencia a disminuir, pero presenta altibajos entre cambios de escenarios. Erosión, en el modelo 2.5D, presenta grandes oscilaciones en la sensibilidad al CUT a través del cambio de escenarios, con una mayor expresión al cambio en el escenario en el año 11.

Una mejor aproximación a este análisis para estas dos últimas variables (escorrentía superficial y erosión), se hace con la comparación del cambio en los valores promedios de algunas de las variables independientes del modelo en las áreas que cambiaron de un año a otro. De las áreas que cambiaron entre períodos se analizaron la Altitud, Pendiente, Índice Topográfico, Proximidad a Ríos y Aspecto.

El anexo 4 ilustra gráficamente estas comparaciones y relaciones entre las variables mencionadas y la sensibilidad al cambio de escorrentía superficial y erosión. Para escorrentía superficial, presenta una pequeña relación con la Altitud promedio para los primeros 5 años. Con relación a Pendiente promedio, las ondulaciones entre períodos tienen alguna relación pero en proporciones diferentes. Gráficamente el Índice Topográfico no presenta el mismo comportamiento oscilatorio, pero si la tendencia en el mismo sentido hasta el año 12, y posteriormente cambia drásticamente. De la misma forma, la Proximidad a los Ríos de las áreas en cambio varían en forma similar, pero éstas solo hasta el año 10. Allí, la variación cambia de escala, pero mantiene el mismo patrón. Con relación a Aspecto, este varía en el mismo sentido de la sensibilidad de escorrentía superficial pero con diferente comportamiento.

La sensibilidad de la erosión entre períodos (años) tiene unos patrones difíciles de definir. Con respecto Altitud, tiene la misma relación que escorrentía superficial. La variación de la Pendiente promedio tiende a ser más explicativa en el caso de erosión. Aspecto es una de las variables con menos relación explicativa al comportamiento de la sensibilidad de la erosión al CUT. La Proximidad a Ríos, casi para todos por períodos de cambio tiene la misma tendencia, pero para entre el año 10 y 11, presenta una estrecha relación con la sensibilidad de la erosión. El Índice Topográfico es uno de los menos explicativos en la erosión viéndolo gráficamente.

El análisis de sensibilidad no se basa solamente en variables aisladas. Un análisis de regresión múltiple muestra que la escorrentía superficial y la erosión son explicadas por las variables independientes en el modelo como todo un conjunto dentro del modelo. La tabla 2 resume los coeficientes de significancia explicativa (R) de la sensibilidad de la escorrentía superficial y de la erosión frente al CUT, con relación a

las variables independientes y los coeficientes de confianza para cada una de las variables involucradas en el análisis.

	Escorrentia superficial		Erosión	
R ²	0.69127		0.77341	
R múltiple	0.83143		0.87944	
Valor F	3.58250		5.46124	
Significancia F	0.05370		0.01760	

	T	Sig. T	T	Sig. T
Aspecto	0.051	0.9607	-1.539	0.1623
Distancia a Ríos	-0.061	0.9526	-1.349	0.2143
Altitud	-0.289	0.7797	-0.186	0.8574
Pendiente	-0.828	0.4317	1.384	0.2037
Indice Topográfico	-0.170	0.8689	-0.802	0.4457
Constante	1.265	0.2413	0.356	0.7310

Cuadro 2. Resumen prueba de significancia por regresión múltiple.

EL coeficiente de regresión múltiple muestra que las variables independientes explican las variables dependientes, en este caso, la sensibilidad escorrentia superficial y erosión en 0.69 y 0.77 respectivamente, con un coeficiente de correlación de 0.83 y 0.88 en forma similar. El valor de significancia F para una probabilidad del 95% de confianza, para escorrentia superficial es un poco salido del rango, mientras que para erosión esta dentro del rango (menor de 0.05). De la misma forma, el valor de significancia T expresa con cuanta probabilidad cada variable independiente es involucrada en la explicación de la sensibilidad de la escorrentia superficial y la erosión al CUT.

Conclusión

De la primera parte, la comparación de los modelos (1D y 2.5D) muestran diferente rendimiento en agua superficial. Los modelos son una simplificación de la realidad y estos tienen diferentes expresiones. La idea no es expresar si un modelo es mejor o peor en cuanto a rendimiento de agua superficial. La importancia en esta comparación, es como los modelos pueden ayudar a entender los procesos envueltos en el experimento como una mejor aproximación a la realidad.

La última parte simplemente expresa que el modelo es robusto en cuanto a los resultados expuestos. Esto no dice que los modelos encajan perfectamente con la aproximación a la representación de los eventos hidrológicos. Lo más importante hasta este punto es que la escorrentia superficial y la erosión se presentan como eventos complejos que necesitan ser trabajados como un todo dentro del modelo el cual involucra los principales eventos para entender como ellos son afectados dentro del proceso de CUT. También, esto muestra la diferencia de respuesta del comportamiento hidrológico entre los diferentes sitios dentro de las cuencas y como la variación de la cobertura de la tierra influye en el paisaje.

Bibliografia

FAO, Food and Agriculture Organization, 1997. [Http://www.fao.org/gtos/about/gtodbdir/GTOSa001.html](http://www.fao.org/gtos/about/gtodbdir/GTOSa001.html).

Koning H.H.J. de, Vekdkamo A., Verbulrg P.H. and Beergsma A.R. 1998. CLUE: A tool for spatially explicit and scale sensitive exploration of land use changes. Wageningen Agricultural University. [Http://www.gis.wau.nl/~landuse1/lima.html](http://www.gis.wau.nl/~landuse1/lima.html)

Mulligan M. 1999. Land Use Change pattern using cellular automata. Work document draft, KCL.

Parck C.C. 1992. Tropical Rain Forest. Biddles Ltd. Guildford and King's Lynn. UK.

Saxton, K. E., Rawls, W. J., Romberger, J. S. and Papendick, R. I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Science Soc. American Journal, V. 50, pp. 1031-1036.