

# Sistemas agroforestales como estrategia para el manejo de ecosistemas de Bosque seco Tropical en el suroccidente colombiano utilizando los SIG

**Nathaly de los Ángeles Mazo\***

**Jorge Eliecer Rubiano\*\***

Universidad del Valle, Cali – Colombia

**Aracely Castro\*\*\***

Consultora Independiente

## Resumen

Los sistemas agroforestales son una alternativa para el manejo de zonas de bosque seco tropical de laderas intervenidas o en degradación. Sus beneficios se basan en el uso eficiente de los recursos, la productividad y la seguridad alimentaria de las comunidades rurales. Localizar lugares más aptos para dichos sistemas es un requisito en el proceso de extensión agrícola. Con este propósito, la utilización de modelos probabilísticos integrados con Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite identificar aquellas áreas potenciales para la implementación de nuevas tecnologías, de modo similar a la identificación de nichos de especies en estudios de biodiversidad. Siguiendo este enfoque, se utilizó el peso de la evidencia y la regresión logística para generar superficies indicativas de áreas adecuadas para implementar la agroforestería en el suroccidente colombiano.

**Palabras claves:** bosque seco tropical, conservación de suelos, dominios de extrapolación, modelación espacial, Quesungual.



DOI: [dx.doi.org/10.15446/rcdg.v25n1.41993](https://dx.doi.org/10.15446/rcdg.v25n1.41993)

RECIBIDO: 10 DE FEBRERO DE 2014. ACEPTADO: 17 DE JUNIO DE 2015.

Artículo de investigación sobre el adecuado abordaje de los sistemas agroforestales, particularmente de Bosque seco Tropical mediante el uso de los SIG.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO: Mazo, Nathaly de los Ángeles, Jorge Eliecer Rubiano y Aracely Castro. 2016. “Sistemas agroforestales como estrategia para el manejo de ecosistemas de Bosque seco Tropical en el suroccidente colombiano utilizando los SIG”. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 25 (1): 65-77. DOI: 10.15446/rcdg.v25n1.41993

\* Dirección postal: Departamento de Geografía. Edificio 384. Ciudad Universitaria Meléndez.  
Correo electrónico: [namwac@gmail.com](mailto:namwac@gmail.com)

\*\* Correo electrónico: [jorge.rubiano@correounivalle.edu.co](mailto:jorge.rubiano@correounivalle.edu.co)

\*\*\* Correo electrónico: [aracely.castrozuniga@fao.org](mailto:aracely.castrozuniga@fao.org)

## Sistemas agroflorestais como estratégia para a gestão de ecossistemas de floresta tropical seca no sudoeste colombiano utilizando os Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

### Resumo

Os sistemas agroflorestais são uma alternativa para a gestão de áreas de floresta tropical seca de encostas intervindas ou em degradação. Seus benefícios estão baseados no uso eficiente dos recursos, na produtividade e na segurança alimentar das comunidades rurais. Localizar lugares mais aptos a esses sistemas é um requisito no processo de extensão agrícola. Com esse propósito, a utilização de modelos probabilísticos integrados com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite identificar aquelas áreas potenciais para a implantação de novas tecnologias de maneira semelhante à identificação de nichos de espécies de estudos de biodiversidade. Seguindo esse enfoque, utilizou-se o peso da evidência e a regressão logística para gerar superfícies indicativas de áreas adequadas para implantar a agroflorestamento no sudoeste colombiano.

**Palavras-chave:** floresta seca tropical, conservação dos solos, domínios de extrapolação, modelação espacial, Quesungual.

## Agro-forestry systems as a strategy for managing the *Bosque Seco Tropical* (Dry Tropical Forest) in southwest Colombia using the systems of geographical information (GIS)

### Abstract

The agro-forestry systems are an alternative in the management of dry tropical forest zones of intervened or degraded edges. Their benefits are based on the efficient use of resources, productivity and food security for the rural communities. To locate the most appropriate sites for these systems is a requirement in the process of agricultural extension. With this proposal, the utilization of probabilistic models integrated with geographic information systems (GIS) allows identifying those potential areas in need of new technologies, similar to the identification of niches of species in biodiversity studies. In keeping with this focus, evidence and logistic regression were used to generate surfaces indicative of adequate areas to implement agro-forestry in Colombia's southwest.

**Keywords:** dry tropical forest, soil conservation, ownership of extrapolation, spacial modeling, Quesungual.

## Introducción

Uno de los ecosistemas más importantes y complejos en Colombia es el Bosque Seco Tropical, no solo por los bienes y servicios ambientales que presta a las comunidades, sino también por el creciente grado de intervención y degradación al que se ha visto sometido en las últimas décadas, producto de la expansión de la frontera agrícola y los asentamientos humanos. Este escenario plantea la necesidad de implementar medidas tendientes a la reducción y mitigación de los impactos en estos ecosistemas.

El Bosque seco Tropical —en adelante, Bs-T— se define como aquella formación vegetal que presenta una cobertura boscosa continua y que se distribuye entre los 1.000 m de altitud; presenta temperaturas superiores a los 24° C (piso térmico cálido) y precipitaciones entre 700 y 2.000 mm anuales, con uno o dos periodos marcados de sequía al año (IAVH 1998). Esta definición del Bs-T corresponde a la clasificación de Holdridge de ‘zonas de vida’, que expresa la relación entre temperatura, precipitación, humedad y las respuestas fisionómicas de las plantas en una misma área (Díaz Merlano 2006).

La desertificación y la sequía son unos de los procesos que causan mayor impacto en las zonas secas (áridas, semiáridas y subhúmedas secas), al afectar alrededor del 35% de la superficie de los continentes (UNNCD, citado por MARN 2009) e impactar a nivel global no solo los sistemas naturales, sino también los sistemas sociales y económicos, incidiendo así en la calidad de vida de las comunidades; efectos que se manifiestan en la disminución de la resistencia de las tierras ante la variabilidad climática, la pérdida de la productividad del suelo, el deterioro de la cubierta vegetal y la generación de situaciones de hambre, hechos que se ven reflejados en situaciones de pobreza y migraciones masivas.

En el marco de la lucha contra los procesos de desertificación y sequía en las zonas secas, los sistemas agroforestales representan un mecanismo para la mitigación de los efectos y prevención de sus causas, además, son una alternativa para su manejo en laderas intervenidas o en proceso de degradación (MAVDT 2005).

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD) (Cumbre de Río de Janeiro 1992) (UN 2002) apoyó un nuevo enfoque integrado del problema e hizo hincapié en la necesidad de medidas tendientes a fomentar el desarrollo sostenible a nivel comunitario. Dentro de tal contexto, la agroforestería es considerada una de las estrategias eficaces de

adaptación al cambio y la variabilidad climática, principalmente en pequeñas comunidades (Nngi 2009).

El Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía en Colombia plantea como uno de los tantos retos a enfrentar de manera integral la desertificación y la sequía, razón por la cual promueve modelos de desarrollo sostenible, acordes con la realidad ambiental, económica y social del país. Además, esta iniciativa se sustenta en el interés del Gobierno Nacional, que es apoyado por organizaciones internacionales como el United Nations Development Programme (PNUD) y recibe la financiación del Global Environment Facility (GEF) a través del proyecto “Conservación y uso sostenible de la biodiversidad en ecosistemas secos para garantizar el flujo de bienes y servicios ambientales y mitigar procesos de deforestación y desertificación 2014-2019”.

En aras de contribuir de manera sistemática a abordar los problemas mencionados, el presente estudio aporta la determinación de los lugares más apropiados donde los sistemas agroforestales tienen mayor potencial para ser implementados, enfocado a zonas de ladera intervenidas y/o en proceso de degradación donde existen relictos de Bs-T, como estrategia de manejo en estos ecosistemas prioritarios de conservación.

## Sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales surgen como una alternativa de desarrollo sostenible al facilitar el aprovechamiento de los recursos naturales y mejorar las condiciones de los suelos en aquellas zonas donde la degradación ha aumentado producto de la expansión de la frontera agrícola, el aprovechamiento no sostenible de los recursos forestales y los conflictos por uso del suelo, entre otros factores (Ministerio del Medio Ambiente et ál. 2000).

Según el MAVDT (2005) el establecimiento de sistemas agroforestales en áreas rurales, donde la presión sobre los bosques ha sido históricamente fuerte, podría ser una alternativa para prevenir procesos de degradación y, de ese modo, aumentar la seguridad alimentaria de las comunidades que habitan en estas zonas. Los Bs-T y muy seco Tropicales (Bms-T) son un ejemplo de los ecosistemas que han sufrido estos graves procesos de transformación, además de haber sido diezmados por la ganadería y la agricultura intensiva.

En el 2002 el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) en el estudio de Zonificación

de los Conflictos de Uso de las Tierras en Colombia (2002), identificaron una superficie en el país de 21 millones de hectáreas potenciales para usos agroforestales, que corresponden al 19,3% del territorio nacional, el 33,4% de estas se encuentran en ecosistemas secos, de los cuales 76,1% están afectadas por algún proceso de desertificación.

El Bs-T es considerado uno de los tres ecosistemas más degradados, fragmentados y menos conocidos; las coberturas vegetales han sufrido en su interior largos e intensos procesos de conversión. De la superficie conocida originalmente, alrededor de 80.000 km<sup>2</sup> de bosques secos a subhúmedos en Colombia, solo queda cerca de 1.200 km<sup>2</sup> (IAVH, PNUMA y Ministerio del Medio Ambiente 1998).

### Sistema agroforestal Quesungual

En América Latina, principalmente en Centroamérica, hay evidencias exitosas de prácticas agroforestales que están siendo implementadas por los agricultores para desarrollar una producción sostenible y diversificada. El Sistema Agroforestal Quesungual —en adelante, SAQ—, implementado en países como Honduras, Guatemala, Nicaragua y El Salvador, ha demostrado altos niveles de rendimiento, comparables con los sistemas de agricultura convencional, además reduce los procesos de degradación del suelo, mejora el nivel de vida de los productores y contribuye a la restauración del medio ambiente (Fernández y Navarro 2005).

El sistema agroforestal Quesungual o Kuxur Rum, según Rodríguez (2008, citado por Gamboa, Gómez e Ibrahim 2009), es una práctica agroforestal originaria del sur del departamento de Lempira, en Honduras, en la que se cultivan plantas de maíz y frijol en parcelas donde también están plantados árboles dispersos (figura 1). Actualmente se introducen otros cultivos de primera necesidad, como el sorgo y el melón.

En cuanto a las prácticas de conservación que ofrece el sistema y la oportunidad de revertir procesos de degradación están: la no quema, labranza cero, manejo de la regeneración natural (CATIE/CESTA 2006, citado por Gamboa, Gómez e Ibrahim 2009), arreglo espacial, distanciamiento de siembra y barreras vivas; todas estas utilizadas en el establecimiento y manejo del sistema agroforestal.

### Materiales y métodos

Los Sistemas de Información Geográfica —en adelante, SIG— ofrecen la posibilidad de incorporar modelos predictivos que hacen uso de herramientas geoestadísticas de relativa rápida y fácil implementación. Bonham-Carter



Figura 1. Sistema Agroforestal Quesungual silvopastoril y agroforestal con café en laderas de Nicaragua. Fotografías de Jorge Rubiano, 2013.

(1994) plantea como uno de los propósitos de los proyectos que involucran los SIG la combinación de datos espaciales, describir y analizar sus interacciones, además de hacer predicciones con modelos que brinden apoyo en la toma de decisiones.

Para localizar los lugares con mayor aptitud del sistema agroforestal Quesungual, en las zonas de ladera



en el suroccidente colombiano, se utilizó el método de Dominios de Extrapolación (Rubiano et ál. 2008; Rubiano y Soto 2009; Rubiano et ál. 2016), calculados a partir de la probabilidad condicional que combina los modelos estadísticos del peso de la evidencia y regresión logística, integrado a la colección de herramientas de geoprocésamiento Spatial Data Modeller —en adelante, SDM—, (Sawatzky et ál. 2004; Sawatzky et ál. 2009) del Sistema de Información Geográfica ArcGIS, el cual permite adicionar mapas categóricos con intervalos ordinales o de relación a escala, para producir un mapa predictivo del lugar donde es probable que ocurra algo similar.

Los dominios de extrapolación, Extrapolation Domain Analysis (EDA), es un método de análisis espacial utilizado para identificar áreas de influencia esperada de una nueva tecnología o conocimiento sobre un área geográfica en particular (Rubiano et ál. 2008; Rubiano y Soto 2009; Rubiano et ál. 2016); el modelo estadístico utilizado es la probabilidad bayesiana que utiliza el algoritmo del peso de la evidencia (Bonham-Carter, Agterberg y Wright 1989; Boehner et ál. 2002) en el cual se utiliza como punto de partida un valor de probabilidad previa de la ocurrencia del fenómeno estudiado en una unidad de área, donde se le asigna pesos a las capas de mapas individuales; cada mapa de entrada es binario y tiene un factor de peso determinado. Además, permite realizar pruebas para validar la independencia condicional de las capas o factores seleccionados, procedimiento conocido como el Test de Independencia Condicional de Agterberg y Cheng (2002).

### Selección y preparación de datos

Para la determinación de las zonas potenciales se utilizaron 200 lugares de entrenamiento georeferenciados en los municipios de Candelaria, Gualcinco y Mapulaca, en el sur del departamento de Lempira, Honduras, donde

el SAQ ha sido implementado con éxito. El conjunto de variables seleccionadas para identificar la probabilidad de adopción del SAQ, definidas como ‘variables de evidencia’, se determinó de acuerdo a las características espaciales o del contexto que pudiesen tener mayor incidencia en dicha aptitud, específicamente a las condiciones biofísicas y socioeconómicas existentes en el área donde se localizan los puntos de entrenamiento (Castro et ál. 2009).

El conjunto de variables seleccionadas en la búsqueda de dominios de extrapolación del SAQ, se listan en la tabla 1. Cabe mencionar que el tipo de formato de las variables de evidencia corresponde a archivos tipo raster enteros.

### Accesibilidad

La variable ‘accesibilidad’ está definida a partir del gradiente de población rural/urbana alrededor de centros poblados de 50.000 o más habitantes. En términos del SAQ, se expresan las relaciones de costo y distancia a los mercados para la comercialización de la producción agropecuaria local.

### Coberturas de la tierra

Las variables de coberturas seleccionadas corresponden a ‘bosque de hoja ancha, rastrojos y área agrícola’ como usos de tierra predominantes en el área de entrenamiento, lo que explica la presencia de recurso forestal y actividades agrícolas como prerrequisitos para la implementación del SAQ.

Los datos utilizados corresponden al Global Map V.1, del Global LandCover (GLC), a partir de datos del sensor remoto MODIS del satélite TERRA para el 2003, con tamaño de pixel a 1 km (30 arc segundos), que clasifica 20 tipos de coberturas. La tabla 2 muestra la reclasificación de las coberturas observadas en el área de entrenamiento.

Tabla 1. Variables seleccionadas para EDA

Variable	Nombre GRID (ID)	Fuente	URL
Accesibilidad	acc_int	Joint Research Centre	<a href="http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/gam/index.htm">http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/gam/index.htm</a>
Bosque de hoja ancha	brdlv_intcls	ISCGM Global Map Data Download Service	<a href="http://www.iscgm.org/gmd/download/glcnm.html">http://www.iscgm.org/gmd/download/glcnm.html</a>
Rastrojos	Shrub_intcls		
Área agrícola	Cropl_intcls		
Pendiente del terreno*	Slope_intcls	CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)	<a href="http://srtm.csi.cgiar.org/">http://srtm.csi.cgiar.org/</a>
SAGA Índice de Humedad	twi_intcls		

\* Calculado a partir del SRTM 90 m Digital Elevation Data.

**Tabla 2.** Variables de cobertura de la tierra reclasificadas

Código	Clasificación GLC	Reclasificación EDA
1	Broadleaf Evergreen Forest	Bosque de hoja ancha
2	Broadleaf Deciduous Forest	
6	Tree Open	Rastrojo
7	Shrub	
8	Herbaceous	
9	Herbaceous with Sparse Tree/ Shrub	
11	Cropland	Área agrícola

Datos: Global Map V.1, del Global Land Cover (GLC) y reclasificación por los autores.

### Modelo Digital de Elevación

El modelo digital de elevación —en adelante, DEM— de la zona de estudio se utilizó para extraer dos variables: la ‘pendiente’ y el índice topográfico de humedad (SAGA Wetness Index, Boehner et ál. 2002), que estima el gradiente de humedad del suelo. La pendiente del terreno es determinante para el establecimiento del SAQ, la similitud en los rangos en el área de entrenamiento así como la similitud con las otras características indican la aptitud. La pendiente se agrupó en clases cada 5%.

El índice topográfico de humedad, Topographic Wetness Index (TWI), se calculó haciendo uso del algoritmo de SAGA, Wetness Index a partir del DEM utilizando System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA), que predice, para los píxeles que se localizan cerca de un canal de agua, un mayor potencial de contenido de humedad.

La figura 2 muestra los resultados finales de la preparación de los datos y la clasificación de cada una de las variables antes de la modelación estadística. Se debe asegurar que las capas tengan la misma proyección cartográfica y correspondan a rasters enteros, con el tamaño de pixel más pequeño, y cubran, en el mejor de los casos, la totalidad del área de estudio.

## Resultados y discusión

Los resultados fueron determinados utilizando la herramienta Grand WOFE (Sawatzky et ál. 2009) del SDM, que combina las funciones del cálculo de los pesos de evidencia y estimación de la aptitud, genera capas tipo raster y tablas de pesos para cada variable de evidencia.

Las rutinas de modelación se aplicaron a cada unidad territorial independientemente, es decir, a nivel de departamento, dado que a medida que es mayor el área, el modelo es más restrictivo y las probabilidades posteriores tienden a disminuir.

La tabla 3 indica que las variables seleccionadas son condicionalmente independientes. La prueba estadística aplicada es  $(T_n)/\text{desviación estándar de } T$ , donde se parte de la hipótesis nula de que  $T_n = 0$ .

**Tabla 3.** Resultados de la Prueba de Independencia Condicional de Agterberg y Cheng

Departamentos	Valle del Cauca	Cauca	Nariño
Ci Total	0,0%	0,0%	0,0%
Test de Independencia Condicional	gw1h	gw1h	gw1h
No. de puntos de entrenamiento observados, n	218	218	218
No. de puntos de entrenamiento esperados, T	52.5	37.3	43.6
Diferencia, T-n	-165,5	-180,7	-174,4
Desviación Estándar de T	7.213	4.455	5.924
Radio de Independencia Condicional	4,15	5,85	4,99
Probabilidad de que este modelo no es condicionalmente independiente es $(T-n)/Tstd$	-22.940.539 is 0,0%	-40.569.985 es 0,0%	-29.433.503 es 0,0%

Datos: generados por el modelo.

En el área de estudio se calculó la aptitud al SAQ determinando la probabilidad posterior para el peso de la evidencia y la regresión logística, cuyos resultados se expresan en términos de área y porcentaje. Estos son clasificados en cuatro categorías que van de ‘muy bajo’ a ‘alto’, como se indica en la figura 3. En total, para el área de estudio se identificó 921.000 ha potenciales para el SAQ, como se observa en la tabla 4.

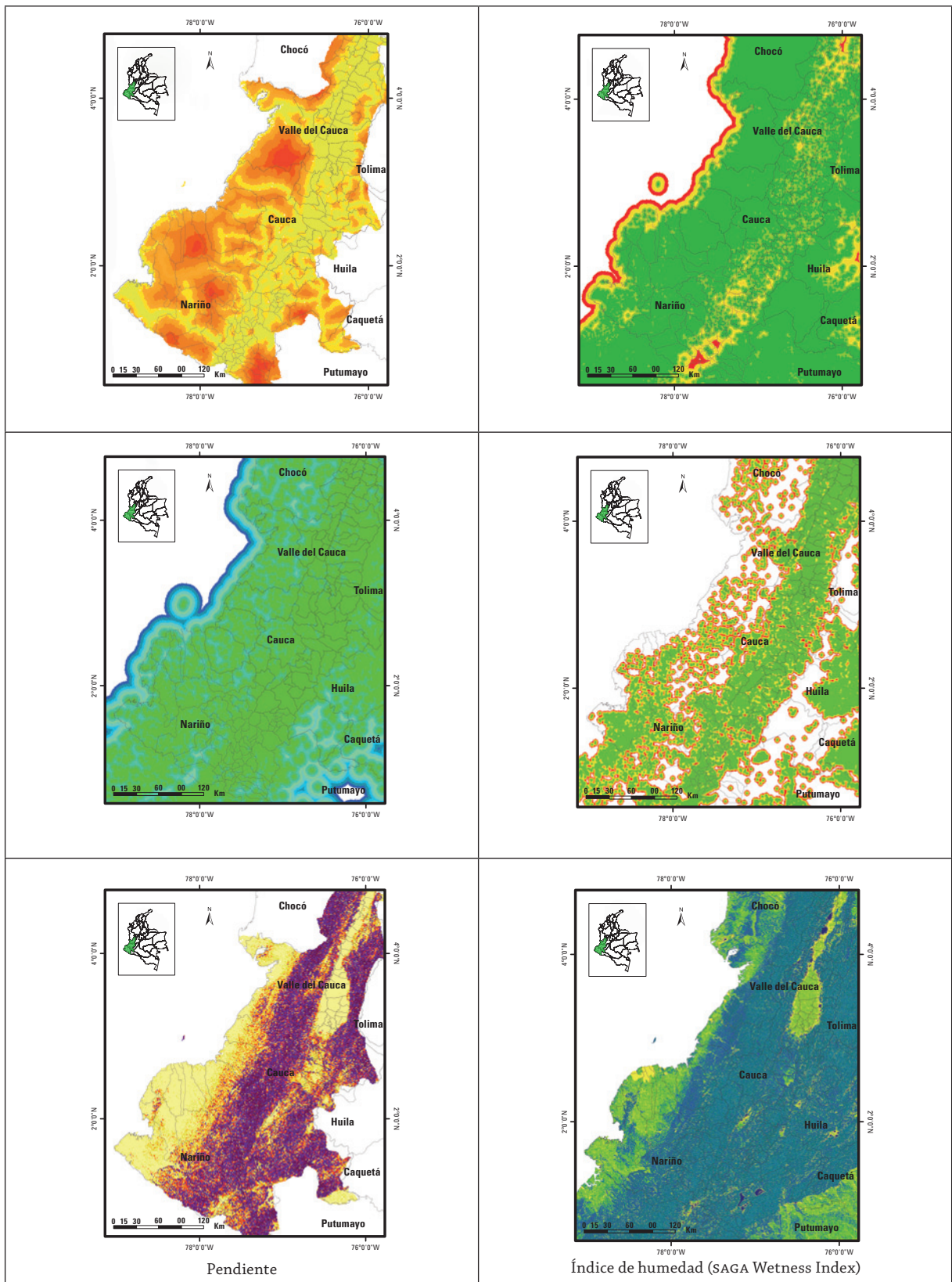


Figura 2. Mosaico de salidas gráficas de las variables seleccionadas. Datos: Global Map v.1, del Global Land Cover (GLC).

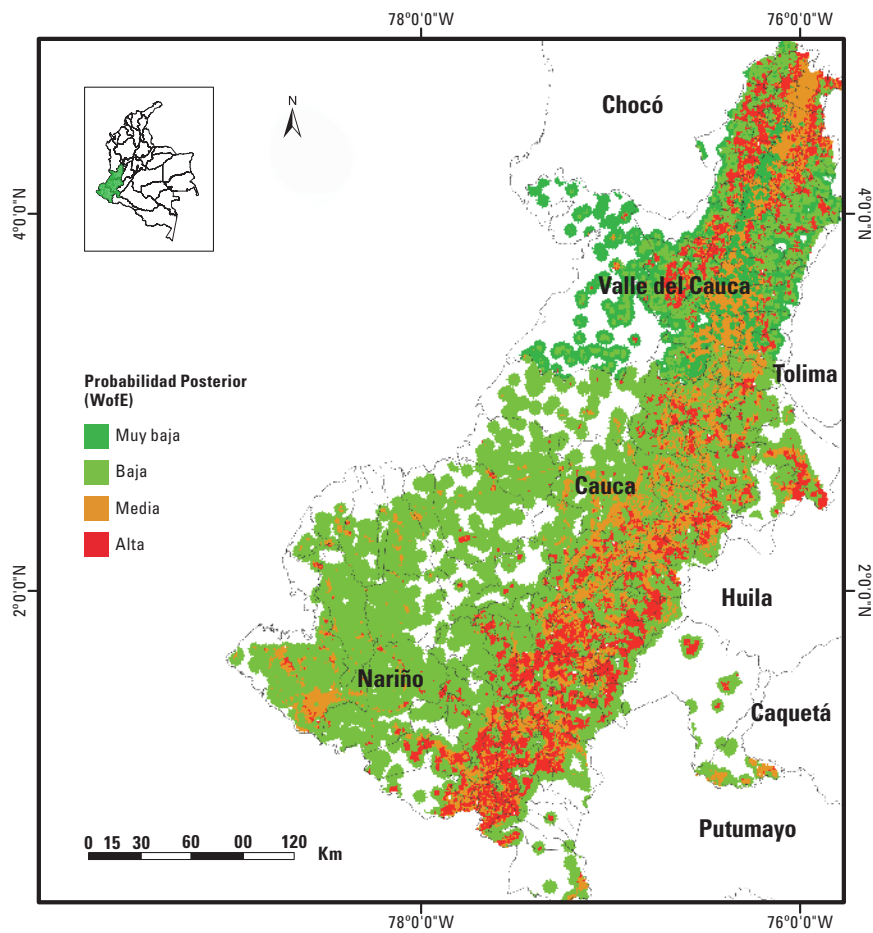


Figura 3. Mapa de áreas potenciales para el SAQ basado en la probabilidad posterior (peso de la evidencia).

La figura 4 muestra los municipios por departamento con mayor área potencial para el SAQ, que presentan valores entre 14.000 y 35.000 ha. Los valores se ordenaron por departamentos y municipios; los primeros seis pertenecen al departamento del Cauca, seguidos por tres municipios para cada uno los departamentos de Nariño y Valle del Cauca. En el departamento del Cauca se destaca una mayor aptitud para la implementación del sistema, en términos de área, que cubre parte de la región del Alto Patía, con predominio de Bs-T, con una precipitación inferior a 2.000 mm/año, en zonas de depósitos aluviales en los valles y depósitos volcánicos en mesetas

Mercaderes, en el departamento del Cauca, constituye el municipio con mayor aptitud para el SAQ. Se encuentra en la zona de enclave subxerofítico del Patía, donde se necesita suplir los requerimientos de cultivos con riego y realizar una repoblación forestal, pues en esta región se presenta deterioro ambiental de los suelos y pérdida de la cobertura vegetal.

Tabla 4. Área potencial para el SAQ en hectáreas para cada categoría y departamento en la zona de estudio

Departamentos	Probabilidad Posterior (WofE)			
	Muy baja	Baja	Media	Alta
Valle del Cauca	634.100	496.300	260.400	252.900
Cauca	-	1.561.100	439.400	297.000
Nariño	-	1.805.300	274.100	371.600
<b>Total</b>	<b>634.100</b>	<b>3.862.700</b>	<b>973.900</b>	<b>921.500</b>

Datos: calculados a partir del modelo.



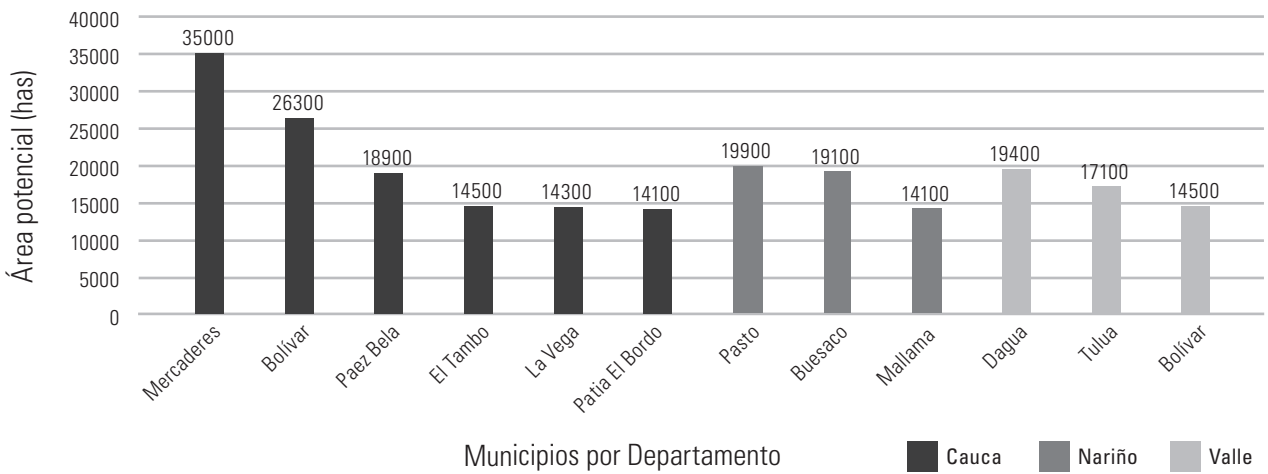


Figura 4. Mapa de áreas potenciales para el SAQ basado en la probabilidad posterior (peso de la evidencia).

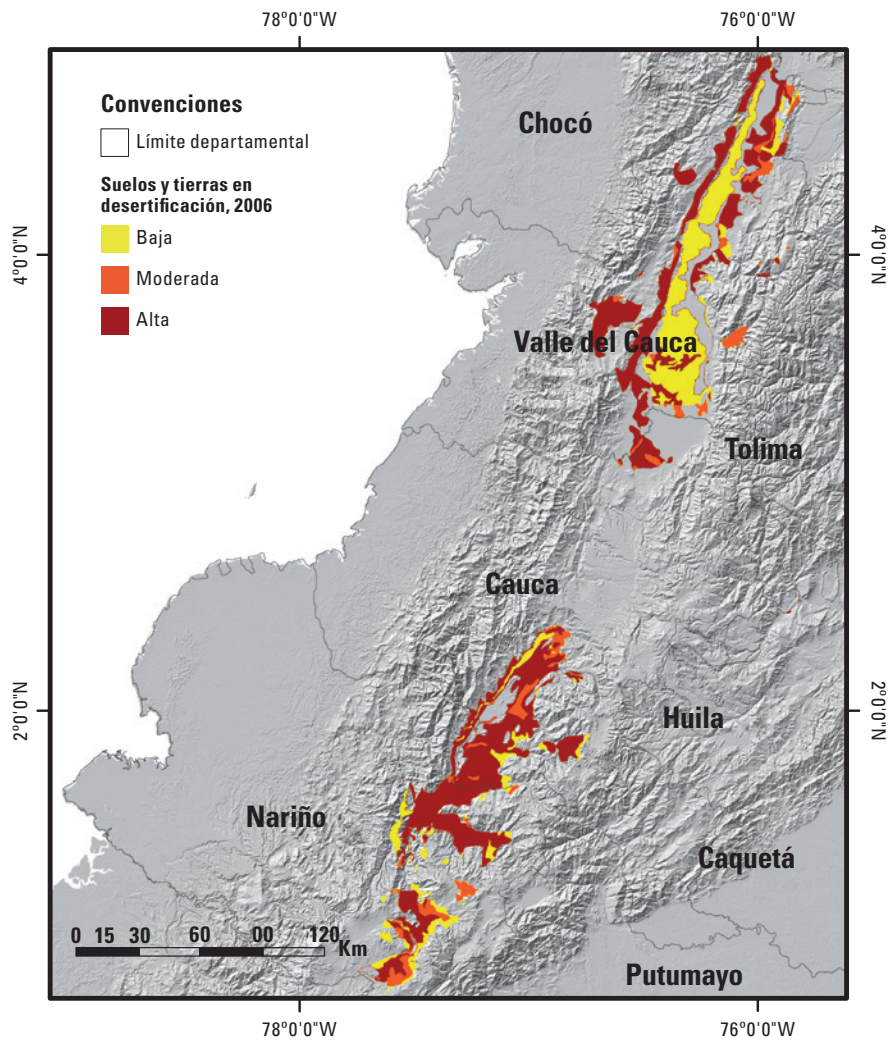


Figura 5. Mapa de degradación de suelos y tierras en desertificación en Colombia. Datos: IDEAM 2013.

Adicionalmente, se calculó el porcentaje de área potencial para el SAQ respecto del área total del municipio, se trata de áreas potenciales que cubren entre el 50 y el 80% del área total de algunos de ellos, principalmente aquellos municipios pequeños ubicados en las estribaciones de las cordilleras y en el Macizo colombiano, como se observa en el mapa de la figura 3, específicamente en el departamento de Nariño.

Para corroborar la pertinencia del SAQ, como una alternativa de manejo en ecosistemas de Bs-T y en laderas intervenidas o degradadas, se utilizó el mapa de Degradación de Suelos y Tierras en desertificación para Colombia elaborado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) con imágenes del 2006, disponible en formato 'wms' (*Web Map Service*) en la página web de Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE) consultado en el 2013. La figura 5 y la tabla 5 expresan la relación entre los resultados encontrados y su localización en zonas que sufren los procesos mencionados.

**Tabla 5.** Localización de áreas en ha del SAQ en zonas en desertificación en Colombia

Suelos y tierra en desertificación (2006)	Probabilidad Posterior (WofE)			
	Muy baja	Baja	Media	Alta
Baja	84.500	39.600	94.300	47.100
Moderada	90	207	271	31.200
Alta	38.600	149.000	125.500	194.900
<b>Totales</b>	<b>132.100</b>	<b>209.300</b>	<b>246.900</b>	<b>273.200</b>

La tabla 5 indica que con la implementación del SAQ en las áreas con alto potencial se lograría impactar, directamente, a las áreas que se encuentran en proceso moderado y alto de degradación debido a procesos de desertificación de los suelos y tierras en Colombia. Esto equivale a 125.000 y 194.000 ha, respectivamente, conforme al mapa de degradación de suelos y tierras de la figura 5, donde las zonas con degradación por desertificación moderada y media están en zonas de ladera.

## Conclusiones

Los sistemas agroforestales constituyen una oportunidad para reducir los procesos de degradación de suelos y tierras en Colombia. Asimismo, dada su eficiencia en el uso de recursos, representan una alternativa de manejo

productivo y sostenible en zonas de ladera y en aquellas áreas de conservación de ecosistemas de Bosque seco Tropical y contribuyen a la seguridad alimentaria de comunidades rurales.

El tipo de técnicas aplicadas mediante modelos estadísticos predictivos y los sistemas de información geográfica ofrecen la oportunidad de socializar el impacto y la importancia de este tipo de estudios de interés geográfico —como la identificación de sitios potenciales para sistemas agroforestales que han sido exitosos en otros lugares y que tienen características similares a los de la zona de estudio—. Estudios que además de poder ser replicados en coberturas vegetales, como el Bosque seco Tropical, pueden desarrollarse en aquellos ecosistemas que presenten retos en la adaptación al cambio climático, contribuyendo así a la reducción de la vulnerabilidad ambiental en áreas de inseguridad alimentaria del trópico seco.

Además, con el avance de las tecnologías de la información y la reducción de los costos en el uso y manejo de información, existe la oportunidad de brindar apoyo a las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuarias —en adelante, UMATAS— locales por medio de la socialización de este tipo de estrategias y a través del uso de técnicas que les facilite hacer un uso más eficiente y óptimo de la información, contribuyendo así a los procesos de ordenamiento territorial y a la oferta de tecnologías para sectores marginados de la economía.

Para determinar el peso de la evidencia en la identificación de un lugar apropiado para un proyecto, hay que tener en cuenta la contribución de cada factor (pesos negativos y positivos), asociar dicha información con el conocimiento del sitio (probabilidad inicial de los sitios con SAQ) y calcular el valor del potencial de cualquier otro nuevo lugar para replicar SAQ (probabilidad posterior). Además, es importante verificar los problemas de condicionalidad e incertidumbre del modelo predictivo y ajustar los resultados con información complementaria.

Los resultados del presente estudio indicaron las áreas potenciales para el SAQ localizadas tanto en la vertiente oriental de la cordillera Occidental como en la vertiente occidental de la cordillera Central en el departamento del Valle del Cauca, en algunas mesetas de la región del Patía en el departamento del Cauca, así como en la zona andina en el departamento de Nariño. Todas estas zonas tienen relictos de bosque seco y algunas presentan un deterioro ambiental en los suelos y pérdida de la cobertura vegetal. Las áreas donde actualmente hay relictos de Bosque seco Tropical incluyen la

parte baja del río Patía, en el departamento del Cauca, y el cañón del río Dagua, en el departamento del Valle del Cauca. Estos resultados se basaron en modelos del peso de la evidencia seleccionados para cada departamento, con probabilidades posteriores cercanas al 60%, por lo que se hace necesario que los resultados sean socializados y verificados con las UMATAS y las comunidades. Dicho proceso se realizó en los municipios con mayores valores en el departamento del Valle del Cauca, donde se halló una gran correspondencia entre lo observado y lo simulado.

Con respecto a las variables de evidencia, se utilizaron fuentes de datos geográficos globales, no se consultaron

fuentes de información nacional dada la falta de datos consistentes en cuanto a la clasificación, temporalidad o disponibilidad; además, los datos nacionales existentes, en ciertos casos, no son compatibles con otras fuentes de información de los países de la región.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen al Departamento de Geografía y la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle y al Programa Jóvenes Investigadores e Innovadores “Virginia Gutiérrez de Pineda”, de Colciencias, por el apoyo logístico y económico para la realización de este estudio.

#### **Nathaly de los Ángeles Mazo**

Geógrafa de la Universidad del Valle (Colombia). Joven Investigadora de Colciencias 2012, Grupo Territorios, Universidad del Valle.

#### **Jorge Eliecer Rubiano**

Ph.D. en Geografía de la Universidad de Nottingham (Inglaterra). Profesor asociado del Departamento de Geografía de la Universidad del Valle (Colombia). Coordinador de proyectos regionales de investigación aplicada al manejo de recursos hídricos en la región Andina.

#### **Aracely Castro**

Doctora en Ciencias del Suelo de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). Líder e investigadora en el área de suelos para América Latina, Agrobiodiversidad y del Programa de Forrajes Tropicales. Consultora independiente.

## Referencias

- Boehner, J., R. Koethe, O. Conrad, J. Gross, A. Ringeler y T. Selige. 2002. "Soil Regionalisation by Means of Terrain Analysis and Process Parameterisation". En *Soil Classification 2001 Report n.º 7*, EUR 20398 EN, editado por E. Micheli, F. Nachtergaele y L. Montanarella, 213-222. Luxembourg: European Soil Bureau, Research Centre.
- Bonham-Carter, Graeme F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientist: Modelling with GIS*. Ontario: Pergamon.
- Bonham-Carter, Graeme F., F. P. Agterberg y D. F. Wright. 1989. "Weights of Evidence Modeling: a New Approach to Mapping Mineral Potential". En *Statistical Applications in the Earth Sciences*, editado por F. P. Agterberg y G. F. Bonham-Carter, 171-183. Canada: Geological Survey of Canada.
- Castro, Aracely, Mariela Rivera, Oscar Ferreira, Jellin Pavón, Edwin García, Edgar Amézquita, Miguel Ayarza, Edmundo Barrios, Marco Rondón, Natasha Pauli, Maria Eugenia Baltodano, Bismarck Mendoza, Luis Alvarez Wélchez y Idupulapati Rao, colaboradores Simon Cook, Jorge Rubiano y Nancy Johnson. 2009. *Quesungual Slash and Mulch Agroforestry System (QSMAS): Improving Crop Water Productivity, Food Security and Resource Quality in the Subhumid Tropics*. Project n.º 15 (PN 15) Cali: International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Challenge Program on Water and Food (CPWF).
- Díaz Merlano, Juan Manuel. 2006. *Bosque seco tropical Colombia*. Cali: Banco de Occidente Credencial.
- Fernández, Liliana y Edgardo Navarro. 2005. *El sistema agroforestal Quesungual: una opción para el manejo de suelos en zonas secas de ladera*. Tegucigalpa: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Gamboa, Harold, Walter Gómez y Muhammad Ibrahim. 2009. "Sistema agroforestal Quesungual: una buena práctica de adaptación al cambio climático". En *Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas como una medida de adaptación al cambio climático en América Central*, editado por Claudia J. Sepúlveda y Muhammad Ibrahim, 47-68. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- IAVH (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt). 1998. *El Bosque seco Tropical (Bs-T) en Colombia*. Villa de Leyva: Programa de inventario de la biodiversidad, grupo de exploraciones y monitoreo ambiental GEMA e IAVH.
- IAVH (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt), PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) y Ministerio del Medio Ambiente. 1998. *Informe Nacional sobre el estado de la Biodiversidad Colombia 1997*, editado por M. E. Cháves y N. Arango, tomo I. Bogotá.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales). 2013. "Servicio de Mapas Web". <http://bacata.ideam.gov.co/geoserver/wms>
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) y Corpoica (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria). 2002. "Vocación de uso de las tierras de Colombia". En *Zonificación de los conflictos de uso de las tierras en Colombia*, cap. III. Bogotá: IGAC y Corpoica.
- MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales Guatemala) y Mecanismo Mundial de la UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). 2009. *Manual de agroforestería para zonas secas y semiáridas*. Guatemala: MARN y UNCCD.
- MAVDT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). 2005. *Plan de Acción Nacional de lucha contra la desertificación y la sequía en Colombia*. Bogotá: MAVDT, The Global Mechanism, UNCCD, PNUD.
- Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Comercio Exterior, Ministerio de Desarrollo Económico, Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2000. *Plan Nacional de Desarrollo Forestal*. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente, Ministerio de Comercio Exterior, Ministerio de Desarrollo Económico, Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Ngigi, Stephen N. 2009. *Climate Change Adaptation Strategies: Water Resources Management Options for Smallholder Farming Systems in Sub-Saharan Africa*. New York: The MDG Centre for East and Southern Africa, The Earth Institute at Columbia University.
- Rubiano, Jorge, S. Cook, B. Douthwaite, M. Rajasekaran y Victor Soto. 2008. "Adapting to Change: How to Accelerate Impact". Actas del 2<sup>nd</sup> International Forum on Water and Food, Addis Ababa Ethiopia, 10 al 14 de noviembre.
- Rubiano, Jorge y Victor Soto. 2009. *Geographical Extrapolation Domain Analysis: Scaling up Watershed Management Research Projects, a Toolkit to Guide Implementation*. CPWF Working Paper 4. Colombo: The CGIAR Challenge Program on Water and Food.
- Rubiano, Jorge, S. Cook, M. Rajasekharan, Victor Soto y B. Douthwaite. 2016. "Extrapolation Domain Analysis: A



- Tool to Anticipate Research Impact". *Water International* (en prensa).
- Sawatzky, D. L., G. L. Raines, Graeme F. Bonham-Carter y C. G. Looney. 2004. *ARCSDM3: ArcMAP Extension for Spatial Data Modelling Using Weights of Evidence, Logistic Regression, Fuzzy Logic and Neural Network Analysis*. [http://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM31/download/ArcSDM3\\_1\\_Documentation.pdf](http://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM31/download/ArcSDM3_1_Documentation.pdf)
- Sawatzky, D. L., Gary Raines, L., G. F. Bonham-Carter y C. G. Looney. 2009. *Spatial Data Modeler (SDM)*. <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=15341>
- UN (Naciones Unidas). 2002. *Cumbre de Johannesburgo 2002*. <http://www.un.org/spanish/conferences/wssd/unced.html>