



Biota Colombiana

ISSN: 0124-5376

biotacol@humboldt.org.co

Instituto de Investigación de Recursos
Biológicos "Alexander von Humboldt"
Colombia

Patiño, Jorge E.

Análisis espacial cuantitativo de la transformación de humedales continentales en
Colombia

Biota Colombiana, vol. 17, núm. 1, julio, 2016, pp. 86-105

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos "Alexander von Humboldt"
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49148413006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Análisis espacial cuantitativo de la transformación de humedales continentales en Colombia

Quantitative spatial analysis of Colombian continental wetlands transformation

Jorge E. Patiño

Resumen

Los humedales están entre los ecosistemas más productivos del mundo, pero su importancia todavía no es ampliamente reconocida. Aunque son ecosistemas sujetos constantemente a cambios naturales, la acción humana ha acelerado las tasas de cambio de forma significativa y se estima que más de la mitad del área de humedales en el mundo se perdió durante el último siglo. En Colombia se verificó esta tendencia y se estimó que casi una cuarta parte de la superficie de humedales ha sido transformada a otro tipo de coberturas terrestres. Este estudio cuantifica las áreas de humedal que se han transformado por intervención antrópica, identifica los disturbios responsables de esa transformación y explora la asociación con otros factores socioeconómicos usando datos espaciales y métodos cuantitativos. Los resultados indican que la mayor parte de áreas de humedal transformadas en el país están dedicadas a la ganadería y la agricultura, y en menor medida a la minería, la urbanización, la construcción de vías y obras civiles. Las relaciones entre la transformación de humedales y los factores de cambio varían a lo largo del territorio, lo cual debe tenerse en cuenta para la gestión y conservación de los humedales del país.

Palabras clave. Cambio de humedales. Factores socioeconómicos. Impulsores de cambio. Regresión ponderada geográficamente.

Abstract

Wetlands are among the most productive ecosystems in the world, but its importance is not yet widely recognized. Although these ecosystems are constantly subject to natural changes, human activity has accelerated change rates significantly and it is estimated that more than half the area of wetlands in the world was lost during the last century. This trend was verified in Colombia and almost a quarter of wetlands surface has been converted to other land covers. Using spatial data and quantitative methods, this study quantifies the transformation of wetland areas in the country, identifies the drivers of this transformation and explores the association with other socioeconomic factors. Results indicate that cattle raising and agriculture are the main drivers of wetland change in the country, and to a lesser extent mining, urbanization, and infrastructure. The relationships of wetland transformation with change drivers vary throughout the territory, which should be considered for wetland management and conservation policies in the country.

Keywords. Change drivers. Geographical weighted regression. Socioeconomic factors. Wetland change.

Introducción

Un humedal es un tipo de ecosistema que se presenta donde las condiciones geomorfológicas e hidrológicas permiten la acumulación de agua durante un tiempo suficiente para la formación de suelos hídricos y la proliferación de vegetación hidrófila y de otros organismos adaptados a estas condiciones (Jackson *et al.* 2014, Vilardy *et al.* 2014). Los humedales están entre los ecosistemas más productivos del mundo, dan sustento directo a millones de personas y proveen bienes y servicios más allá del límite visible del cuerpo de agua, entre los que se destacan el mejoramiento de la calidad del agua, la regulación de crecientes y amortiguación de inundaciones, el soporte de altos valores de diversidad biológica y de productividad secundaria, y la provisión de hábitats para la vida silvestre (Yuan y Zhang 2010).

De acuerdo con Jackson *et al.* (2014), desde una perspectiva de tiempo geológico, los humedales se crean, cambian de lugar y desaparecen constantemente, y casi todos los humedales en el mundo tienen menos de 12000 años de antigüedad. Aunque algunas áreas de concentración de humedales, como la Amazonia, pueden ser más antiguas, los humedales en sí están en constante cambio debido a la dinámica fluvial y de sedimentos. Los principales impulsores del cambio natural de los humedales son la subsidencia, la sedimentación, la eutrofización, la erosión, la glaciación, el cambio climático, los cambios en el nivel freático, el aumento de la temperatura y los cambios en el nivel del mar.

A la dinámica natural de cambio en los humedales se le suma el impacto que tienen sobre ellos las actividades humanas. Los humedales son objeto de altas presiones ya que frecuentemente son considerados como áreas que prestan servicios de poco valor (Ideam 2010, Turner *et al.* 2000), y el cambio en ellos se ha acelerado significativamente en las últimas décadas como consecuencia de las actividades humanas (Ramachandra *et al.* 2005, Hussien Aragaw 2014). Para el año 2005 se estimaba que aproximadamente el 50 % de la superficie de humedales del mundo había desaparecido en el último siglo (Zedler y Kercher 2005), y esta degradación se considera un problema ambiental

grave, con impactos importantes en la sostenibilidad ambiental global (Chen y Liu 2015). Colombia no es ajena a esta tendencia; la Ciénaga Grande de Santa Marta, uno de los humedales más importantes del país y declarada humedal RAMSAR en 1998, reserva de la Biosfera en 2000 y área de importancia internacional para la conservación de aves en 2001, ha sido objeto de intervenciones importantes desde 1950 hasta el presente (Vilardy *et al.* 2011). Grandes áreas de humedal de las planicies inundables del valle medio del río Magdalena han sido transformadas por la expansión pecuaria (Márquez 2001, Garzón-Yepes y Gutiérrez-Camargo 2013); muchos humedales del valle del río Sinú se desecaron con el fin de desarrollar agricultura extensiva desde 1960 (Camargo 2012); para el valle del río Cauca se reportó una pérdida del 88 % de los humedales entre 1950 y 1980 (Restrepo y Naranjo 1987 citado en Beach y Luzzadder-Beach 2012); y en el Altiplano de Bogotá se reportó una pérdida del 97 % de área de humedales en el siglo XX (Wielgus y Franco 1997, Ramírez *et al.* 2013). Aunque la lista anterior no es exhaustiva, permite tener una idea de la tendencia general de la pérdida de áreas de humedal en el país, incentivada por los gobiernos nacionales de la segunda mitad del siglo XX con el apoyo de instituciones internacionales como el International Bank for Reconstruction and Development (hoy Banco Mundial) para estimular el desarrollo económico (Camargo 2012).

El estudio de la transformación de humedales es un tema que ha venido ganando importancia en las últimas décadas. El reconocimiento del impacto del cambio climático, y en particular del aumento del nivel de mar, sobre los humedales costeros, un número de documentos cada vez mayor acerca de la importancia ecológica de los humedales en general, así como el reciente aumento en la disponibilidad de herramientas de monitoreo basadas en percepción remota, han contribuido a la proliferación de estudios de cambio de humedales. En general, la evaluación de cambios en humedales involucra el uso de datos de una misma región en diferentes fechas para cuantificar el cambio observado en el paisaje (Klemas 2013). La mayoría de las veces este análisis se elabora a partir de cartografía temática de coberturas de la tierra,

obtenida a través de foto-restitución y levantamientos de campo, o a través del uso de sensores remotos y procesamiento de imágenes satelitales.

En Colombia el estudio de los humedales, su delimitación y estado actual, se vio impulsado por los graves efectos que causó la ola invernal en los años 2010 y 2011. A raíz de este fenómeno surgió la necesidad de conocer la ubicación de los humedales para apoyar las políticas de ordenamiento territorial y prevención de desastres en los departamentos y municipios del país. Por otro lado, Colombia, al ser signatario de la convención Ramsar, tiene el compromiso de elaborar el inventario nacional de humedales del país. El Instituto Humboldt, con el apoyo de las instituciones del SINA y el Fondo Adaptación construyó el mapa de identificación de humedales a partir de la información oficial disponible a escala 1:100.000 de suelos, geomorfología y coberturas de la tierra, y comenzó el estudio de las transformaciones a las que están siendo sometidos los humedales del país.

En 2014 se realizó una evaluación de impulsores de cambio de humedales en gran parte del territorio nacional (Ricaurte *et al.* 2014). Ese estudio abordó el análisis de las actividades con mayor impacto sobre los humedales e intentó un primer análisis de cambios a partir de mapas oficiales de coberturas del terreno en escala 1:100000 publicados en 2005 y 2012 (SIAC 2015). Sus resultados son muy importantes en lo referente al análisis y mapeo de impulsores de cambio. Sin embargo, el enfoque usado para la de detección de cambios tiene una limitación importante: el mapa de coberturas publicado en 2005 fue elaborado con un mosaico de imágenes satelitales capturadas entre los años 2000 a 2002 y el publicado en 2010 incluye información satelital de los años 2005 a 2009 (Ideam 2012). Así, algunas zonas del país tienen información separada tres años en el tiempo, mientras que otras pueden llegar a tener nueve años de diferencia, lo que dificulta el cálculo de la magnitud del cambio, puede enmascarar algunas tendencias y limita el periodo de tiempo analizado a menos de una década.

En este estudio se aborda la identificación de las zonas de humedal que han sido intervenidas en Colombia, usando información de la versión más actualizada

del mapa de humedales (Instituto Humboldt, versión de abril de 2015) y del mapa de coberturas del terreno de 2010 (Ideam 2010, 2012). A partir del análisis de la información cartográfica y el uso de análisis espacial cuantitativo (Fotheringham *et al.* 2002, Anselin 2003, Charlton y Fotheringham 2009), el presente estudio busca responder a las siguientes preguntas: ¿Cuánta superficie de humedales se ha perdido en la extensión continental del país? ¿Qué actividades económicas están aprovechando las áreas transformadas? ¿Qué otros factores socioeconómicos están relacionados con la transformación? ¿Cómo varía la importancia de los impulsores de cambio en el territorio nacional? Los resultados de este trabajo son útiles para entender la transformación de los humedales y los factores relacionados, además de ser una herramienta importante para mejorar su gestión en el país.

Material y métodos

Las variables usadas con más frecuencia para cuantificar la transformación de los paisajes de humedal son el área de las coberturas de humedal y el porcentaje de la misma en todo el paisaje analizado, registradas en dos fechas diferentes, y el cambio se cuantifica en términos del área de humedal transformada a otras coberturas en el periodo de tiempo analizado (Song *et al.* 2011, Yu *et al.* 2011, Jiang *et al.* 2012, Ottinger *et al.* 2013). Debido a las limitaciones mencionadas de los mapas oficiales de coberturas del terreno, en este trabajo se analiza la transformación de todas las áreas que fueron mapeadas como zonas de humedal. Para estas zonas se cuantifica el área de coberturas del terreno de origen natural y el área de las coberturas del terreno asociada a la intervención humana o que ha sufrido procesos de degradación de tierras o incendios forestales.

Datos

Las hectáreas de humedal se tomaron del mapa de humedales del Instituto Humboldt (2015), que identificó cinco categorías de humedal: 1) Humedal permanente abierto: la presencia de agua es constante y no hay árboles. 2) Humedal permanente bajo dosel: la presencia de agua es constante pero la

lámina de agua está cubierta por el dosel de los árboles. 3) Humedal temporal: la presencia de agua no es constante pero ocurre con cierta periodicidad. 4) Potencial medio de humedal: características edafológicas o geomorfológicas identifican el área con una probabilidad media de ser humedal. La inundación tiene periodos de retorno interanuales. 5) Potencial bajo de humedal: características edafológicas o geomorfológicas identifican el área con una probabilidad baja de ser humedal. La inundación tiene periodos de retorno inter anuales. El mapa de coberturas de la tierra de 2010 (Ideam 2012) se usó para identificar las diferentes coberturas de la tierra en las zonas de humedal y cuantificar las áreas intervenidas por actividades humanas de forma agregada y diferenciada por categoría de humedal.

Se creó una malla cuadrada regular de 10 km que cubre todo el territorio continental del país para mapear el grado de transformación de una manera objetiva e independiente de los límites administrativos. Para cada celda de la malla se cuantificó el área de humedal, el área de coberturas intervenidas dentro de humedales y el porcentaje de área intervenida sobre el área total de la celda.

Los límites municipales se usaron como unidad espacial de análisis para la implementación de modelos de regresión lineal y explorar las posibles relaciones entre la magnitud de la transformación de humedales y algunos factores socioeconómicos. Los municipios son las unidades espaciales más pequeñas para las cuales se cuenta con información socioeconómica con cobertura nacional completa. Los límites municipales se tomaron de la cartografía base del país en escala 1:100.000 actualizada a 2014 cedida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac). Para las unidades municipales se calculó el área de humedal, el área transformada de humedal y el porcentaje del área del municipio que corresponde a humedal transformado.

Por otro lado, se procesó información espacial de índices de presión por ganadería, agricultura y minería de Ricaurte *et al.* (2014) para asociarla a los municipios; y se complementó con información de productividad, violencia, educación y desarrollo a partir de bases de datos oficiales del país producidas

en diferentes entidades, tales como el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (Dane), el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y el Igac entre otras, que fue compilada y organizada en el trabajo de Cusva-Verdugo (2014).

Métodos

La figura 1 muestra el diagrama de flujo general del análisis de transformaciones. El análisis se hizo en dos etapas: 1) cuantificación de las coberturas intervenidas en zonas de humedal y mapeo del grado de transformación en malla regular de 10 km de lado, y 2) análisis de regresión lineal multivariada teniendo en cuenta efectos espaciales para unidades municipales. Estas etapas se describen a continuación.

Cuantificación de áreas de humedal transformadas

La cuantificación de áreas de humedal transformadas se hizo a partir de la intersección del mapa de humedales con el mapa de coberturas de la tierra. El mapa de humedales fue generado en formato raster con un tamaño de celda de 25 m. Este fue vectorizado conservando el atributo de la clase de humedal y luego intersectado con el mapa de coberturas de la tierra. El resultado de la intersección se editó para seleccionar sólo las coberturas que pueden asociarse con alguna intervención de origen antrópico (Tabla 1), y se cuantificó el área de coberturas intervenidas para cada clase de humedal y para cada actividad.

El mapa de las áreas seleccionadas como intervenidas se intersectó nuevamente con la malla regular de 10 km de lado, para mapear el grado de transformación a lo largo del país de forma independiente de los límites administrativos. Por otro lado se hizo la intersección del mismo mapa con los límites municipales y se cuantificó el área de coberturas intervenidas dentro de humedales en cada municipio (área transformada) y el porcentaje de área transformada sobre el total del área municipal.

Análisis de regresión lineal

El análisis de regresión multivariada lineal se realizó usando los municipios como unidad espacial de análisis. Para esto se compiló información socioeconómica municipal de variables relacionadas

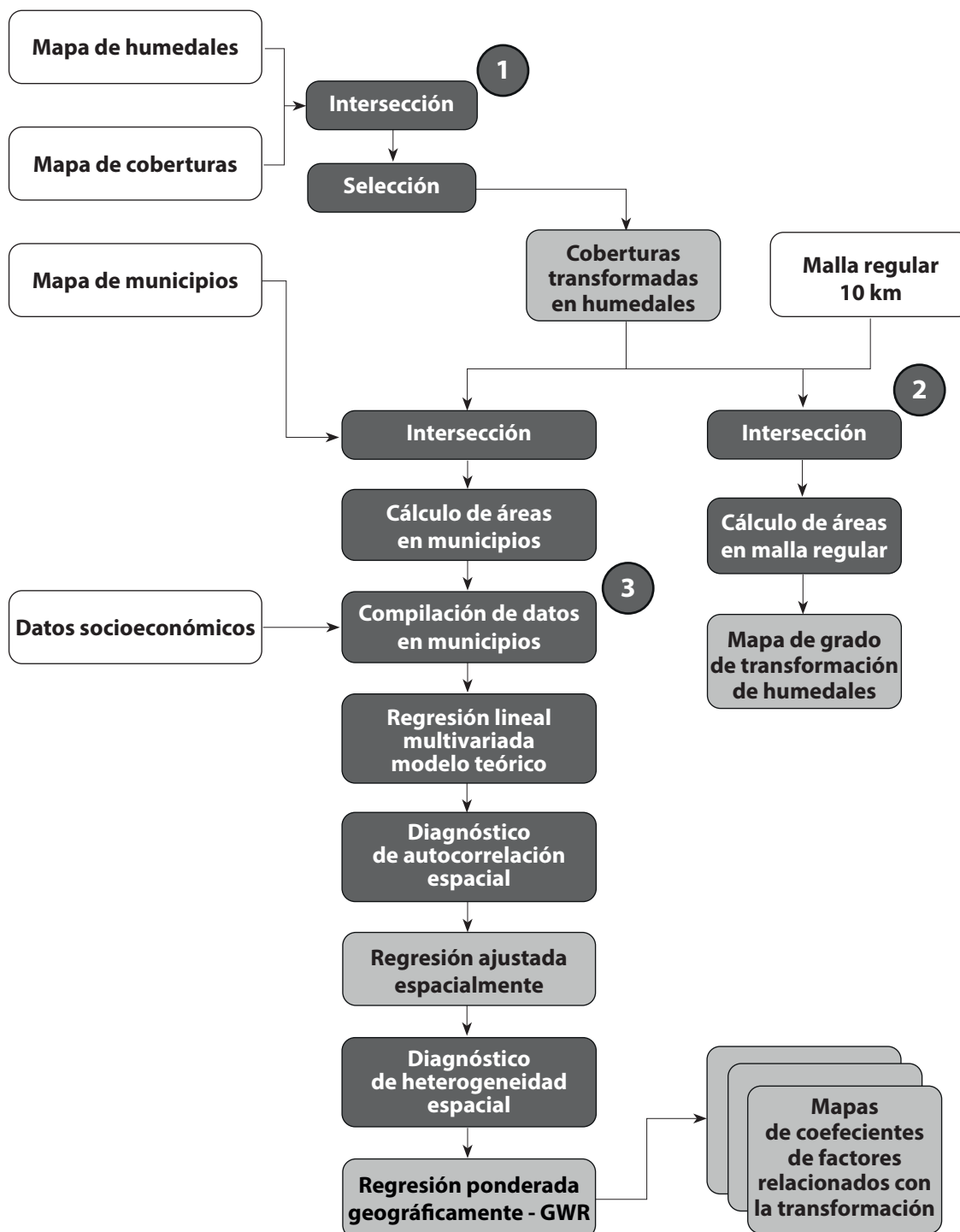


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología.

Tabla 1. Coberturas transformadas en humedal y actividades asociadas.

Leyenda en mapa de coberturas Ideam (2010)	Actividad asociada
1.1.1. Tejido urbano continuo	Urbanización
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	Urbanización
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	Urbanización
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	Obras civiles
1.2.3. Zonas portuarias	Obras civiles
1.2.4. Aeropuertos	Obras civiles
1.2.5. Obras hidráulicas	Obras civiles
1.3.1. Zonas de extracción minera	Minería
1.3.1.2. Explotación de hidrocarburos	Minería
1.3.1.6. Explotación de sal	Minería
1.4.1. Zonas verdes urbanas	Urbanización
1.4.2. Instalaciones recreativas	Urbanización
2.1.1. Otros cultivos transitorios	Agricultura
2.1.2.1. Arroz	Agricultura
2.1.2.2. Maíz	Agricultura
2.1.3.1. Algodón	Agricultura
2.1.4.1. Cebolla	Agricultura
2.1.4.2. Zanahoria	Agricultura
2.1.5.1. Papa	Agricultura
2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos	Agricultura
2.2.1.2. Caña	Agricultura
2.2.1.2.1. Caña de Azúcar	Agricultura
2.2.1.2.2. Caña Panelera	Agricultura
2.2.1.3. Plátano y banano	Agricultura
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	Agricultura
2.2.2.2. Café	Agricultura
2.2.2.3. Cacao	Agricultura
2.2.3.1. Otros cultivos permanentes arbóreos	Agricultura
2.2.3.2. Palma de aceite	Agricultura
2.2.4. Cultivos agroforestales	Agricultura
2.2.5. Cultivos confinados	Agricultura
2.3.1. Pastos limpios	Ganadería
2.3.2. Pastos arbolados	Ganadería
2.3.3. Pastos enmalezados	Ganadería
2.4.1. Mosaico de cultivos	Agricultura
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	Agropecuaria
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Agropecuaria
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	Ganadería
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	Agricultura

Cont. Tabla 1. Coberturas transformadas en humedal y actividades asociadas.

Leyenda en mapa de coberturas Ideam (2010)	Actividad asociada
3.1.3. Bosque fragmentado	Deforestación
3.1.3.1. Bosque fragmentado con pastos y cultivos	Deforestación
3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria	Deforestación
3.1.5. Plantación forestal	Forestal
3.1.5.2. Plantación de latifoliadas	Forestal
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	Deforestación
3.2.3.1. Vegetación secundaria alta	Deforestación
3.2.3.2. Vegetación secundaria baja	Deforestación
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	Desertificación
3.3.4. Zonas quemadas	Zonas quemadas

con producción, violencia, educación y desarrollo, además de variables relacionadas a la presión sobre los humedales por ganadería, agricultura y minería. El análisis de regresión se hizo siguiendo el procedimiento recomendado por Anselin (2005) para verificar y corregir efectos espaciales, que consta de los siguientes pasos: implementación de un modelo de regresión multivariada con mínimos cuadrados ordinarios (MCO); verificación de normalidad de los errores y diagnóstico de dependencia espacial (autocorrelación); implementación de un modelo de regresión ajustada espacialmente: verificación de presencia de autocorrelación residual y de heterogeneidad espacial; e implementación de un modelo de regresión ponderada geográficamente (GWR, por sus siglas en inglés) para explorar la variación espacial en las relaciones.

El porcentaje de área transformada de humedal en cada municipio se modeló en función de las variables territoriales y socioeconómicas usando un modelo de regresión lineal multivariada con MCO. Con este modelo se indaga si la transformación de humedales en el país también podría estar relacionada con otros factores socioeconómicos, y también se usó para explorar si las relaciones son estacionarias, es decir, que se explican de la misma forma a lo largo del territorio, o si presentan variación espacial. El porcentaje de área de humedal transformada en cada municipio se usó como variable de respuesta en el modelo. A esta variable se le aplicó una transfor-

mación logarítmica para mejorar el comportamiento del modelo y cumplir con una de las suposiciones básicas de una regresión lineal: la normalidad de los errores, que indica que el modelo no está sesgado. Todo el análisis de regresión lineal, tanto la regresión lineal por MCO como la ajustada espacialmente y la GWR, se implementaron en el programa de análisis estadístico R (R Core Team 2013).

Para la identificación de variables relacionadas a los factores mencionados se usó una estrategia de selección con base en regresiones paso a paso de un conjunto grande de variables. Se consideró que una variable es una buena candidata para entrar al modelo si: 1) tiene soporte teórico o un comportamiento coherente con lo reportado en la literatura académica e informes técnicos, 2) la relación con la transformación es estadísticamente significativa, y 3) que la información que aporta al modelo no es redundante.

Las variables explicativas incluidas y su comportamiento esperado en el modelo teórico son las siguientes:

IPA_p: índice de presión por agricultura (Ricaurte *et al.* 2014) ponderado por el área del municipio. Se espera una asociación positiva que indique que a mayor presión por agricultura, mayor incidencia de la transformación.

IPG_p: índice de presión por ganadería (Ricaurte *et al.* 2014) ponderado por el área del municipio. Se

espera una relación positiva que indique que a mayor presión por ganadería, mayor transformación.

IPM_p: índice de presión por minería (Ricaurte *et al.* 2014) ponderado por el área del municipio. Se espera también una relación positiva.

IRCA: índice de riesgo de calidad de agua por municipio. Fuente: DNP 2012 (Cusva-Verdugo 2014). También se espera una asociación positiva.

DV₂: densidad de vías sin pavimentar de dos carriles que son transitables todo el año. Fuente: cartografía básica IGAC 1:100.000. También se espera una asociación positiva: a mayor densidad de vías de este tipo, mayor transformación.

IncUR: incidencia (en porcentaje) del índice de pobreza multidimensional en la zona urbana del municipio, datos de 2005. Fuente: Cusva-Verdugo (2014). Se espera una relación positiva que indique que a mayor pobreza, mayor depredación de los recursos y por lo tanto mayor transformación.

IncRU: incidencia (en porcentaje) del índice de pobreza multidimensional en la zona rural del municipio, datos de 2005. Fuente: Cusva-Verdugo (2014). La relación esperada es igual a la descrita para la variable anterior.

Ln_DF: Desplazamiento forzado, datos de personas expulsadas del municipio desde 2000 hasta 2010. Se aplicó transformación logarítmica para reducir el rango y asegurar un mejor comportamiento del modelo. Fuente: Acción Social, Presidencia de la República de Colombia (2011). Reporte General por Ubicación Geográfica: Total de hogares y personas incluidas en el RPUD según lugar de expulsión - Datos por municipio, citado por Cusva-Verdugo (2014). Según reportes de prensa el desplazamiento forzado es a veces una de las etapas iniciales de la transformación de humedales, por lo que se espera también una asociación positiva.

Ln_PIB: Producto Interno Bruto municipal. Se aplicó transformación logarítmica para reducir el rango y asegurar un mejor comportamiento del modelo. Fuente: Dane (2014). Valor agregado de grandes ramas de actividad económica año 2011 y 2012, citado por Cusva-Verdugo (2014). También se espera una asociación positiva con la transformación.

Variables de régimen espacial. Se incluyeron variables tipo *dummy* (que pueden tomar sólo dos valores: 1 para cuando se expresa pertenencia a una región y 0 para lo contrario) para dar cuenta de la posible variación espacial de las relaciones en el modelo. Para este efecto se usó la división en vertientes hidrográficas del país del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam 2015). Luego de la exploración con la regresión paso a paso se identificaron como estadísticamente significativas las variables de pertenencia a las vertientes del Caribe (V_Caribe), Cauca (V_Cauca), Amazonia (V_Amazonia), Pacífico (V_Pacífico) y Magdalena Medio (V_Magd).

El modelo teórico de regresión lineal por MCO se analizó para verificar que no hubiera problemas de multicolinealidad o redundancia, verificar la normalidad de los errores y determinar la presencia de autocorrelación espacial. Para el chequeo de multicolinealidad se calculó el factor de incremento de la varianza para cada variable explicativa. La normalidad de los errores se analizó con un gráfico Cuantil-Cuantil y se usaron los tests de la I de Moran y de los Multiplicadores de Lagrange para determinar la presencia de autocorrelación espacial (Anselin, 2005), y se implementó un modelo de retardo espacial para dar cuenta de este efecto. El modelo de retardo espacial se analizó para determinar la presencia de heterogeneidad espacial usando el test de Breusch-Pagan (Anselin 2005). La presencia de heterogeneidad espacial indicaría que las relaciones entre la variable de respuesta y las variables explicativas del modelo no son homogéneas en el espacio, sino que la magnitud y el sentido de esas relaciones varían en el espacio.

La regresión ponderada geográficamente permite verificar si las relaciones entre la variable de respuesta y las variables explicativas varían en el espacio, y lo hace por medio del cálculo y ajuste de los coeficientes de la regresión para cada unidad espacial de análisis usando un número de vecinos más próximos determinados por un ancho de banda (Fotheringham *et al.* 2002). Esta regresión se implementó usando un ancho de banda determinado automáticamente en el programa R con la función *gwr.sel* del paquete *spgwr* (Bivand 2013) y una

ponderación de tipo Gaussiana. Esta función encuentra un ancho de banda para la selección de unidades usadas para el ajuste local optimizando el error de las regresiones y selecciona el ancho de banda que minimiza el error cuadrado medio del modelo. Los resultados de la regresión ponderada geográficamente se exportaron a formato *shapefile* para crear los mapas de variación de los coeficientes del modelo con el programa QGIS (QGIS Development Team 2015).

Resultados

Áreas de humedal transformado

La tabla 2 muestra el área total de humedales del país por tipos y el área transformada, y la tabla 3 muestra las áreas de humedal transformado en el país, diferenciando por clase de humedal. Las actividades asociadas a la transformación de áreas de humedal que tienen mayor incidencia son la ganadería, la

Tabla 2. Áreas de humedal “mapeadas” y transformadas por categorías de humedal.

Categorías de humedal	Área total (ha)	Área transformada (ha)	(%)
Humedal permanente abierto	2.560.791	9.645	0,38
Humedal permanente bajo dosel	1.588.211	109.361	6,89
Humedal temporal	17.816.934	2.075.535	11,65
Potencial medio	5.010.178	2.206.798	44,05
Potencial bajo	3.717.808	2.931.317	78,85
Todos los humedales	30.361.266	7.332.656	24,15

Tabla 3. Áreas de humedal “mapeadas” y transformadas por tipo de humedal.

Actividad	Todos los humedales		Humedal permanente abierto		Humedal permanente bajo dosel		Humedal temporal		Potencial medio		Potencial bajo	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Agricultura	560.123	7,6	130	1,3	8.551	7,8	156.282	7,5	131.570	6	263.591	9
Agropecuaria	1.127.612	15,4	982	10,2	18.811	17,2	311.874	15	402.080	18,2	393.865	13,4
Deforestación	1.086.996	14,8	726	7,5	51.053	46,7	456.495	22	339.887	15,4	238.836	8,1
Desertificación	81.112	1,1	52	0,5	104	0,1	19.285	0,9	3.534	0,2	58.138	2
Forestal	14.232	0,2	1	0	343	0,3	7.195	0,3	1.224	0,1	5.468	0,2
Ganadería	4.099.134	55,9	3.938	40,8	29.506	27	1.023.674	49,3	1.268.717	57,5	1.773.298	60,5
Infraestructura	7.824	0,1	3	0	1	0	967	0	1.334	0,1	5.518	0,2
Minería	20.861	0,3	2.544	26,4	75	0,1	4.460	0,2	6.060	0,3	7.722	0,3
Urbanización	164.206	2,2	5	0,1	60	0,1	7.307	0,4	7.899	0,4	148.934	5,1
Zonas quemadas	170.555	2,3	1.264	13,1	857	0,8	87.996	4,2	44.492	2	35.947	1,2
Total	7.332.656	100	9.645	100	109.361	100	2.075.535	100	2.206.798	100	2.931.317	100
(%) del total de humedal intervenido	100		0,1		1,5		28,3		30,1		40	

agricultura y la deforestación, en ese orden. Esta última refleja el comienzo de la ampliación de la frontera agrícola y pecuaria.

Grado de transformación de humedales

La figura 2 muestra el grado de transformación de humedales en el territorio colombiano de forma independiente de los límites administrativos. El valor asignado a cada celda es el porcentaje de área de humedal que fue transformado a otras coberturas con respecto al área total de la celda.

De acuerdo con estos resultados, se observa mayor incidencia de transformación de humedales en la costa pacífica en los departamentos de Nariño y Cauca; a lo largo de las llanuras aluviales del río Cauca a lo largo del departamento del Valle del Cauca; en la zona de la Sabana de Bogotá; a lo largo del piedemonte oriental de la cordillera Oriental; y en la región de Urabá, la Depresión Momposina y parte de los departamentos de la costa atlántica.

Implementación de modelos de regresión

Con respecto a la selección de variables incluidas en los modelos de regresión, Ricaurte *et al.* (2014) afirma que las actividades productivas como la ganadera, la agricultura y la minera generan altos impactos sobre la estabilidad ecológica de los humedales en Colombia, por lo que estas variables no deben faltar en un modelo teórico de transformación de humedales en el país. En cuanto a la inclusión de otras variables asociadas a factores socioeconómicos que inciden en la transformación de humedales, en la literatura académica el cambio en las áreas de humedal también se ha relacionado con el incremento en el producto interno bruto (PIB) y la densidad de población (Lin *et al.* 2007, Song *et al.* 2010, Zhao *et al.* 2010, Jiang *et al.* 2014, Yuan *et al.* 2014) así como al desarrollo de infraestructura vial y la construcción de otras obras civiles (Nielsen *et al.* 2008, Jiang *et al.* 2012, Klemas 2013).

En la implementación del modelo de regresión el gráfico Cuantil-Cuantil no indicó problemas de normalidad en los errores, pero el resultado de los

tests de la I de Moran y de los Multiplicadores de Lagrange indicó la presencia de autocorrelación espacial en la variable dependiente, por lo que se corrió una regresión ajustada espacialmente del tipo retardo espacial con una matriz de contigüidad tipo *Rook*, en la que se considera que dos polígonos son vecinos si comparten un borde.

El resultado del test de Breusch-Pagan sobre el modelo de retardo espacial indicó la presencia de heterogeneidad espacial en los datos que aún no había sido capturada por las variables *dummy* de régimen espacial. Lo anterior justificó el uso de una regresión ponderada geográficamente para explorar la variación espacial en las relaciones entre los factores usados en el modelo teórico y la incidencia de transformación de humedales.

Modelos de regresión lineal

La tabla 4 presenta los coeficientes e indicadores de ajuste de los modelos MCO y de retardo espacial implementados. La tabla 5 presenta los resultados del modelo GWR. La figura 3 muestra el histograma de los residuales del modelo MCO, así como el gráfico Cuantil-Cuantil, donde se observa que los residuales de este modelo se ajustan aproximadamente a una distribución normal. Los indicadores de ajuste del R^2 ajustado (modelo MCO), el $\text{pseduo-}R^2$ (modelo de retardo espacial) y el R^2 global (GWR), así como el criterio de información de Akaike (AIC) indican el mejor ajuste del modelo GWR en comparación con los otros modelos. La figura 4 presenta los mapas de variación del R^2 local y de los coeficientes de las variables del modelo GWR.

Discusión

El análisis de transformaciones presentado en este estudio se basa en la cuantificación de áreas de humedal transformadas a otras coberturas. Otros cambios que son muy importantes en cuanto a los servicios ecosistémicos que proveen los humedales no se analizan en este trabajo por no contar con datos suficientes de cobertura nacional que permitan cuantificar esos aspectos de la transformación.

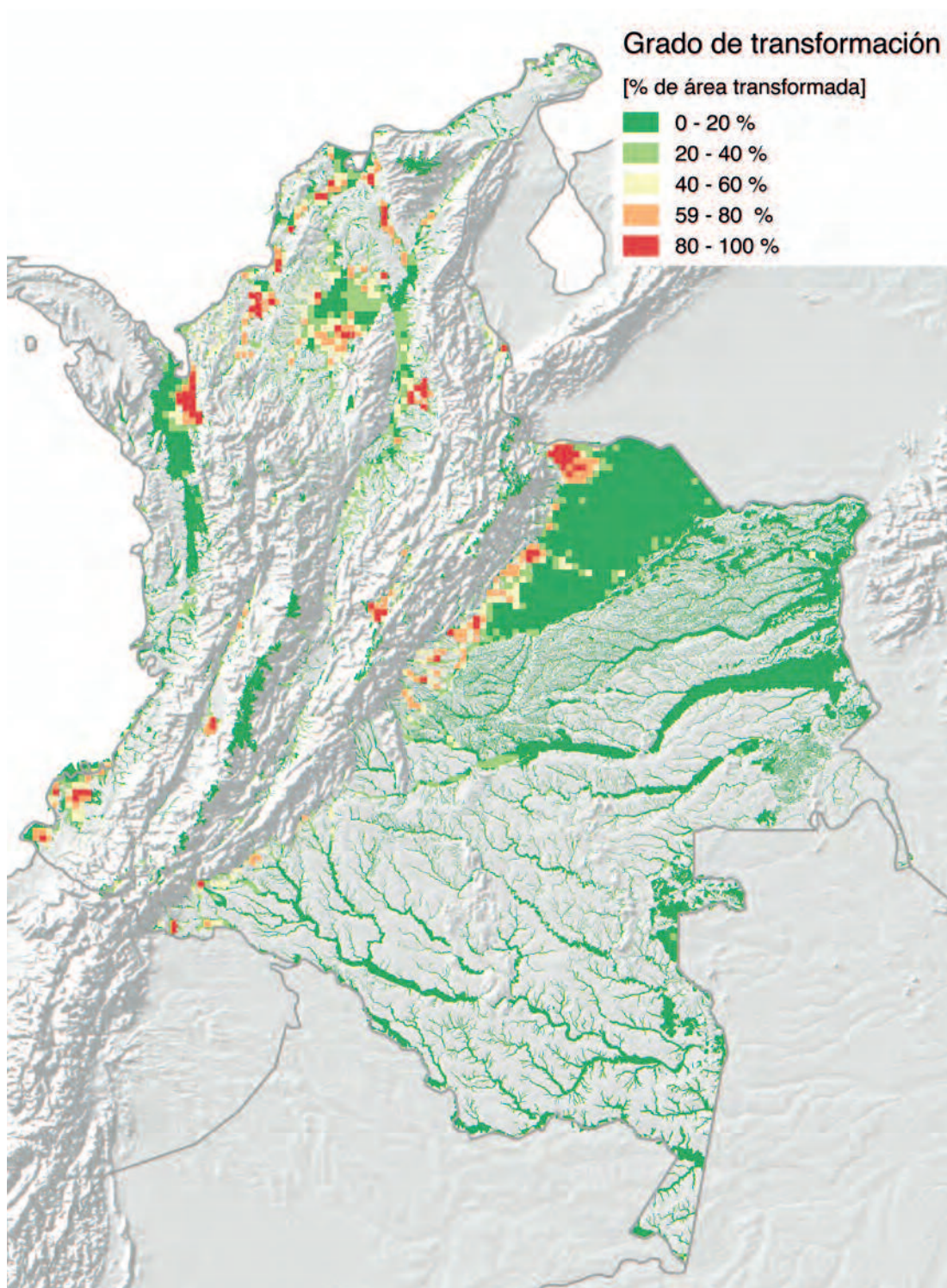


Figura 2. Mapa del grado de transformación de humedales en Colombia. Clasificación en intervalos con el método de intervalos iguales.

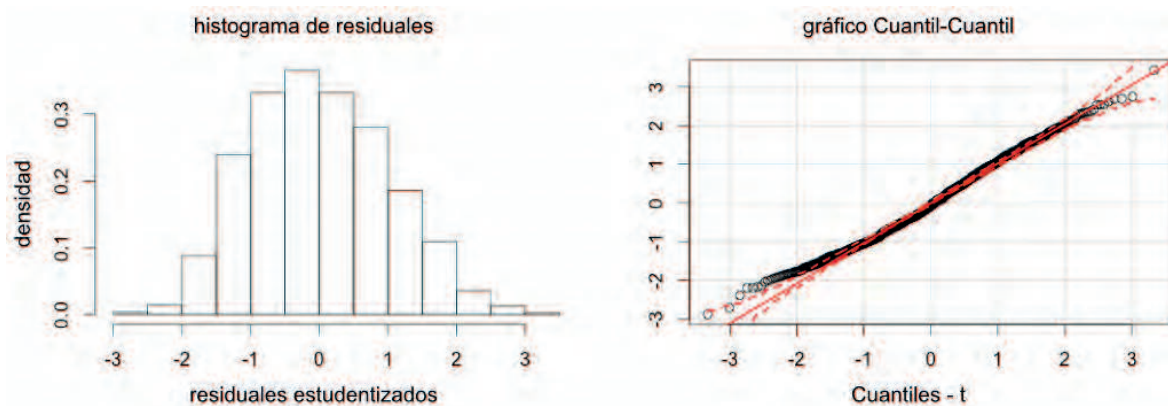
Tabla 4. Coeficientes de los modelos de regresión lineal multivariada y del modelo de regresión con retardo espacial. Variable de respuesta: Logaritmo natural del porcentaje de área de humedal transformada. Unidad espacial de análisis: municipios, N = 1120.

	Modelo MCO	Modelo de retardo espacial
Constante	-1,8730 ***	-1,6175 ***
IPA_p	0,3760 ***	0,2813 ***
IPG_p	0,6868 ***	0,4160 ***
IPM_p	5,1192 **	4,2513 ***
IRCA	0,0036 ***	0,0026 **
DV_2	1,8120 *	0,9625 •
IncUR	0,0191 ***	0,0077 ***
IncRU	-0,0136 ***	-0,0054 **
Ln_DF	-0,1009 ***	-0,0670 ***
Ln_PIB	0,2597 ***	0,1525 ***
V_Caribe	1,2203 ***	0,4536 ***
V_Cauca	-0,7087 ***	-0,3896 ***
V_Amazonia	0,6832 ***	0,5519 ***
V_Pacifico	0,3857 ***	0,3222 ***
V_Magd	0,2276 **	0,1821 **
Rho ¹		0,6522 ***
R ² ajustado	0,52	
Pseudo R ²		0,66
AIC	2981,3	2596,1
Estadístico F	86,11 ***	
Estadístico Wald		647,08 ***
Test LM para autocorrelación residual		2,19 (no significativo)
Test Breusch-Pagan para heterogeneidad espacial		35,69 ***

Nota: Códigos de significancia estadística, valores-p: *** = 0,001; ** = 0,01; * = 0,05; • = 0,1. ¹Rho: retardo espacial de la variable dependiente, valor promedio de los vecinos en cada observación.

Tabla 5. Coeficientes estimados para el modelo GWR. Variable de respuesta: logaritmo natural del porcentaje de área de humedal transformada. Unidad espacial de análisis: municipios, n = 1120. Ancho de banda: 65638,35. Kernel tipo Gauss.

	Mínimo	1er Cuantil	Mediana	3er Cuantil	Máximo	Global
Constante	-4,86E+00	-1,54E+00	-8,83E-01	-1,20E-01	1,52E+01	-1,6325
IPA_p	-1,97E+00	6,29E-02	2,57E-01	4,91E-01	1,54E+00	0,1938
IPG_p	-1,92E+00	1,95E-01	5,82E-01	1,08E+00	2,28E+00	0,7492
IPM_p	-9,98E+03	-1,29E+00	3,17E+00	5,20E+00	5,32E+03	2,5768
IRCA	-2,02E-02	-6,55E-04	2,51E-03	4,31E-03	1,59E-02	0,0021
DV_2	-8,49E+01	-3,47E+00	3,37E-02	2,18E+00	5,22E+02	0,8453
IncUR	-4,36E-02	7,51E-03	1,56E-02	1,96E-02	7,41E-02	0,0318
IncRU	-7,93E-02	-2,89E-02	-1,62E-02	-4,36E-03	1,74E-02	-0,0175
Ln_DF	-4,16E-01	-1,35E-01	-5,25E-02	1,15E-02	4,93E-01	-0,1042
Ln_PIB	-2,14E-01	7,04E-02	2,52E-01	3,59E-01	5,07E-01	0,2699
R ² global	0,72					
AIC	2537,2					

**Figura 3.** Histograma y gráfico Cuantil-Cuantil de los residuales del modelo MCO.

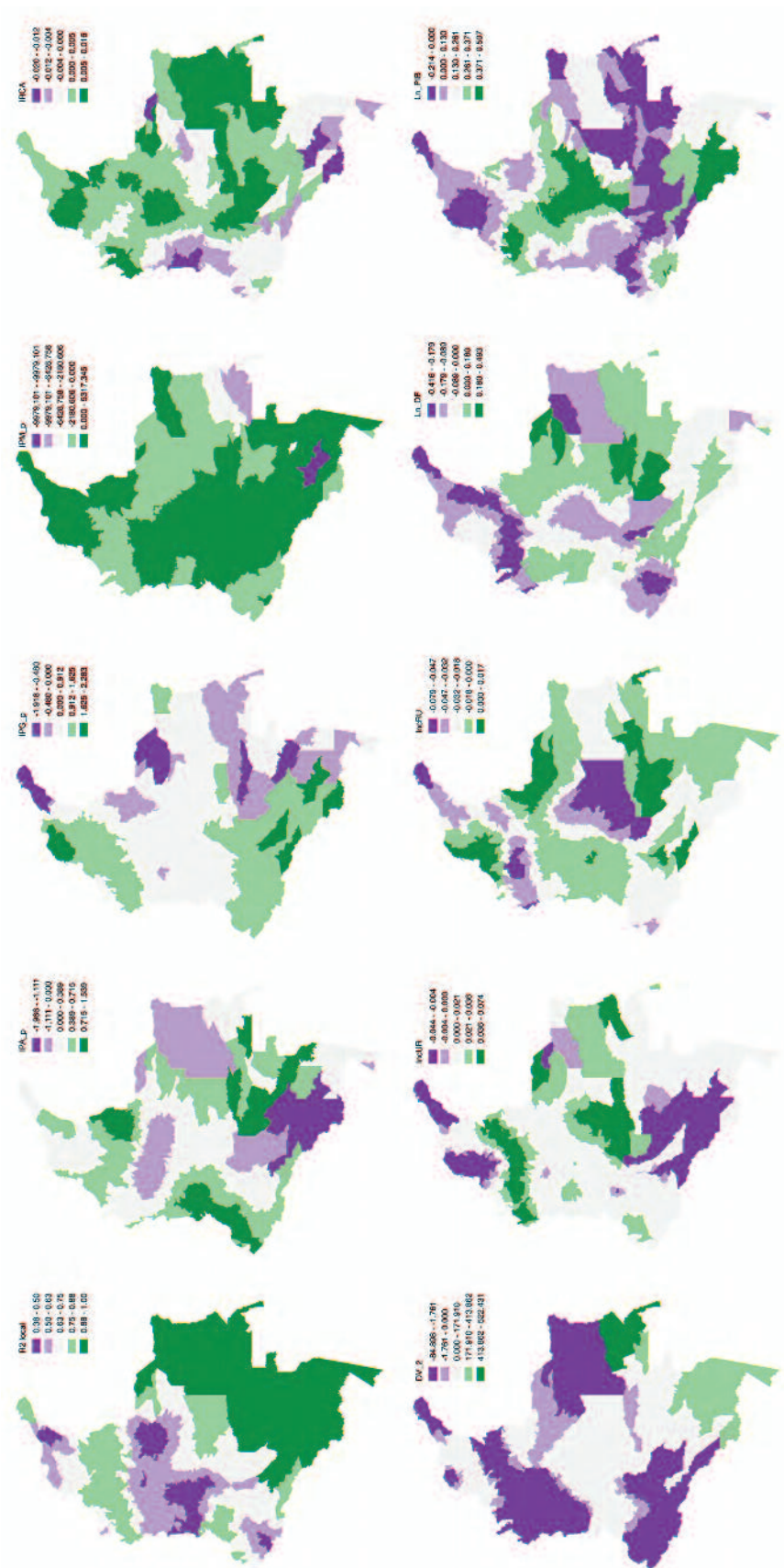


Figura 4. Mapas de los resultados del modelo GWR. Muestran la variación del R^2 local (esquina superior izquierda) y de los coeficientes de las variables explicativas del modelo. Clasificación en intervalos con el método de quiebres naturales.

Éstos incluyen la alteración de la calidad del agua, la disminución de la biodiversidad, y los efectos **acumulativos de procesos de transformación e intervención en el gradiente altitudinal de las cuencas**, como la construcción de diques y embalses, **que impactan sobre la capacidad de regulación de inundaciones de los humedales localizados aguas abajo de las zonas intervenidas**. Sin embargo, la cuantificación de áreas de humedal transformadas es el aspecto más usado alrededor del mundo para cuantificar el cambio en humedales (Li *et al.* 2010, Carle 2011, Disperati y Pasquale Virdis 2015), y permite obtener resultados comparables con otras regiones del mundo.

Alrededor del 24 % de las zonas que tienen características de humedal o evidencias de que fueron humedal en el pasado reciente han sido transformadas en el país. Casi la totalidad de la transformación ha afectado a las clases de humedal temporal, potencial medio y potencial bajo, con más del 98 % del total de la superficie de humedal transformada. Las principales actividades humanas responsables de la pérdida de áreas de humedal en Colombia están relacionadas a la actividad agropecuaria: ganadería, agricultura y deforestación para ampliación de la frontera agrícola. La suma de las áreas intervenidas por estas actividades alcanza más del 90 % de toda el área transformada de los humedales del país. Esto concuerda en gran medida con los principales impulsores de cambio de los humedales en otras partes del mundo (Rebelo *et al.* 2009, Niu *et al.* 2012, Rodríguez-Eraso *et al.* 2013), aunque en Colombia sobresale la ganadería, que da cuenta por sí sola del aprovechamiento de más del 50 % de las áreas de humedal transformadas en el país, con más de cuatro millones de hectáreas de humedal transformado que hoy tienen coberturas asociadas al pastoreo.

Al analizar los humedales diferenciando por clase se repite la misma tendencia, excepto en el caso de los humedales permanentes bajo dosel, que presentan su mayor afectación por deforestación: 47 % (51.053 ha de 109.361 ha transformadas). Esto se explica en parte por la demanda que tienen los productos maderables de los bosques inundables, que han sido sometidos a

la explotación no controlada durante varias décadas en las selvas húmedas del Chocó y la región de Urabá. Se resalta también la afectación por minería en la clase de humedal permanente abierto, la cual es la segunda actividad con mayor impacto en la pérdida de área de esta clase de humedal: 2544 ha (26 %).

Lo anterior supone grandes retos políticos para el país, ya que en Colombia la ganadería y la minería son actividades económicas con una rentabilidad muy alta (Gómez-Vivas 2013, Superintendencia de Sociedades 2013). La ganadería se ha extendido a zonas donde, a pesar de no ser aptas para la actividad, se cree que es más rentable que la conservación de los espacios naturales. Así, las evaluaciones ecológicas-económicas de los humedales cobran importancia, y es necesario que sean evaluaciones de largo plazo y que en la valoración se incluyan todos los servicios que estos ecosistemas proveen para tener una idea realista de lo que se puede perder al inducir el cambio hacia otras actividades que se suponen con alta rentabilidad en el corto plazo (Ramachandra *et al.* 2005).

El mapa del grado de transformación de humedales muestra mayor incidencia de este fenómeno en la zona del piedemonte llanero, en la cuenca del Magdalena-Cauca y en la costa Caribe. Esto indica que los humedales de la Amazonia y Orinoquia son los que han sufrido menor transformación, lo que podría atribuirse en parte a la baja densidad de población en esas zonas y a la ausencia de infraestructura vial, que dificulta el acceso a las mismas, y podría haber ayudado a mantenerlas al margen de los impulsores de transformación. La accesibilidad de la población a los paisajes naturales ha sido usada frecuentemente para explicar el impacto antrópico en los ecosistemas en otras partes del mundo (Sheng *et al.* 2012).

Los resultados del análisis de regresiones deben ser leídos con cuidado. Los modelos implementados no pretenden predecir la intensidad del fenómeno, sino más bien ayudar a explicar sus posibles causas y la variación de las relaciones a lo largo del territorio. Los modelos implementados (Tablas 4 y 5) indican que existen relaciones estadísticamente significativas entre la intensidad de la transformación y las variables

asociadas a la agricultura, ganadería, minería, calidad del agua y densidad de vías, como se esperaba de acuerdo con la cuantificación de áreas transformadas y a la literatura académica sobre el tema. La intensidad de la transformación también presenta relaciones estadísticamente significativas con indicadores de pobreza (incidencia de pobreza multidimensional urbana y rural), violencia (desplazamiento forzado) y desarrollo (producto interno bruto), pero la intensidad de esas relaciones, así como la dirección, no son homogéneas a lo largo del territorio. El hecho de que estas relaciones sean estadísticamente significativas no implica que exista relación causa-efecto, pero sí ayuda a comprender mejor el fenómeno.

En la estrategia de selección de variables para el modelo se incluyeron variables de temperatura media y precipitación media en el municipio, pero ninguna de estas dos variables mostró relaciones significativas con la pérdida de área de humedal. Varios autores han relacionado también el cambio de humedales con el cambio climático global reflejado en cambios de temperatura y precipitación (Zhang *et al.* 2011, Jiang *et al.* 2014, Wang *et al.* 2014). Sin embargo, los datos climáticos para Colombia no indican que haya habido un cambio significativo de la temperatura media en las zonas rurales durante los años de los que se tiene registro.

Los indicadores de ajuste de los modelos, el R^2 ajustado del modelo MCO, el pseudo- R^2 del modelo de retardo espacial y el R^2 global del modelo GWR, que varían entre 0,5 y 0,7, indican que las variables usadas explican más de la mitad de la variabilidad del porcentaje de área de humedal transformada en cada municipio, pero todavía dejan un porcentaje importante de la variabilidad del fenómeno sin explicar. El modelo GWR intenta dar cuenta de la heterogeneidad espacial del fenómeno y la variación de las relaciones con las variables explicativas a lo largo del territorio. El criterio de información de Akaike (AIC) indica también un mejor ajuste del modelo GWR comparado con los otros modelos.

De acuerdo con los resultados del modelo GWR, las relaciones con todas las variables explicativas son no estacionarias, es decir, en algunos lugares tienen

signo positivo, lo que indica que a mayor valor de la variable, mayor incidencia de transformación; mientras que en otros lugares tienen signo negativo, indicando una relación opuesta entre la variable explicativa y la variable de respuesta. Al examinar los mapas de coeficientes, es interesante la relación casi opuesta de las variables de incidencia de pobreza urbana y rural (IncUR e IncRU, respectivamente). La pobreza urbana tiene relación positiva con la transformación de humedales en la mayor parte del territorio nacional, mientras que la pobreza rural muestra una relación negativa en la mayor parte del país. Estas relaciones, aparentemente contradictorias, podrían ser explicadas por la forma como se mide el fenómeno de la pobreza y las grandes diferencias que existen entre ser catalogado como pobre en las zonas urbanas y rurales del país. Estos resultados estarían indicando que la población rural pobre se relaciona con el entorno natural de una forma distinta que la población urbana, siendo esta última la que tiene mayor impacto negativo sobre los humedales.

La relación con la variable de desplazamiento forzado, indicativa de la incidencia del conflicto armado en el país, también tiene resultados contrarios a lo esperado. En algunas zonas del país el desplazamiento forzado es una de las etapas iniciales de la transformación de los humedales, como ha sido reportado para el caso de la Ciénaga Grande de Santa Marta (www.semana.com/nacion/articulo/destruccion-de-la-cienaga-grande-no-se-detiene/423477-3). Pero el modelo indica que la relación entre desplazamiento forzado y transformación de humedales no es igual en todo el país. En gran parte del territorio la relación es negativa, lo que podría indicar que en muchas zonas lo que ha ocurrido es que la violencia ha expulsado a campesinos y colonos de muchas áreas naturales y ha ayudado a disminuir la presión sobre los ecosistemas. Rodríguez-Eraso *et al.* (2013) mencionan que la emigración es una de las causas de recuperación del bosque de transición. Este fenómeno en particular merece una investigación más profunda para ser explicado satisfactoriamente.

Otro resultado interesante del modelo es la relación entre el PIB municipal y la transformación de humedales. Si se supone que un PIB alto indica mayor

desarrollo, este resultado indica que en gran parte del territorio nacional el desarrollo ha impactado de manera negativa los humedales: valores más altos de transformación relacionados con valores altos de PIB. El modelo indica esta situación en gran parte del centro del país, que incluye casi la totalidad de la zona andina (excepto algunos municipios del sur occidente del país), buena parte de la costa atlántica y de la costa pacífica, y áreas muy extensas al sur de la Amazonía y en parte de la Orinoquía. Lo anterior puede ser el reflejo de la forma tradicional como se han gestionado los humedales y del poco entendimiento que se tiene sobre los servicios que aportan a la sociedad (Ramachandra *et al.* 2005).

Conclusiones

Este análisis permitió verificar que la ganadería y la agricultura son las actividades con mayor impacto negativo sobre los humedales en el país. La mayor parte de la transformación se ha dado sobre los humedales temporales, los de potencial medio y los de potencial bajo, que da cuenta del 98 % de la transformación. Se verificó también el impacto de la minería, en particular sobre los humedales permanentes abiertos. Otras actividades humanas responsables de la transformación, aunque en menor medida, están relacionadas con la construcción de obras civiles y de infraestructura, la urbanización, y las plantaciones forestales. Áreas con procesos de degradación de tierras avanzados, así como las zonas quemadas, que pueden ser producto de fenómenos naturales o de la actividad antrópica, también hacen parte de las áreas mapeadas como humedal que hoy no tienen coberturas naturales.

El mapa del grado de transformación de humedales es una herramienta útil para el monitoreo y la gestión de los humedales a escala nacional. Éste puede considerarse como la línea base o la foto de la transformación actual. Este mapa podrá ser actualizado cada vez que se genere una nueva versión del mapa de coberturas de la tierra y compararse con el resultado aquí presentado para estimar tendencias y velocidades de transformación a lo largo del país.

El análisis cuantitativo y los resultados de los modelos de regresión implementados son una herramienta útil de cara a la gestión diferenciada de los humedales del país. Este ejercicio indica que las relaciones de la transformación con los impulsores de cambio y otros factores correlacionados no es estacionaria, sino que cambia a lo largo del territorio. Una política inteligente de gestión y conservación de humedales deberá tener en cuenta esta realidad y proponer diferentes acciones en diferentes partes del territorio de acuerdo con el comportamiento local del fenómeno.

También se resalta el hecho de que la transformación de humedales está relacionada con variables asociadas a pobreza, violencia y al desarrollo, aún después de controlar los otros factores relacionados al fenómeno. Más desarrollo no implica *per se* una mejor gestión de los recursos naturales, como lo indica la asociación positiva entre el PIB y el área transformada en gran parte del país. Las relaciones entre pobreza y violencia con la disminución del área de humedales son complejas y merecen ser estudiadas con mayor profundidad.

Agradecimientos

Este estudio fue realizado en el marco del convenio interadministrativo suscrito entre el Fondo Adaptación y el Instituto Alexander von Humboldt (No. 008 de 2012). Los insumos usados para el análisis aquí presentado son el resultado del gran esfuerzo de cooperación y coordinación institucional que se dio en el marco del convenio mencionado entre el Igac, el Ideam, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Instituto Alexander von Humboldt.

Bibliografía

- Anselin, L. 2003. Spatial externalities, spatial multipliers, and spatial econometrics. *International Regional Science Review* 26: 153-166.
- Anselin, L. 2005. Exploring spatial data with GeoDa: A Workbook (Revised). Center for Spatially Integrated Social Science. Urbana, IL. 226 pp.
- Beach, T., y S. Luzzadder-Beach. 2012. Pre-Columbian People and the Wetlands in Central and South America. Pp: 83-103. *En*: F. Menotti & A. O'Sullivan (Eds.).

- The Oxford Handbook of Wetland Archaeology. Oxford University Press.
- Bivand, R. 2013. Package "spgwr". Geographically weighted regression. CRAN Repository.
- Camargo, A. 2012. **Landscapes of Fear: Water Grabbing, Wetland Conservation, and the Violence of Property in Colombia.** *En: International Conference on Global Land Grabbing II.* Land Deals Politics Initiative.
- Carle, M. V. 2011. Estimating wetland losses and gains in Coastal North Carolina: 1994-2001. *Wetlands* 31: 1275-1285.
- Charlton, M. y A. S. Fotheringham. 2009. Geographically weighted regression. Maynooth, Co Kildare, Ireland. 14 pp.
- Chen, M. y J. Liu. 2015. Historical trends of wetland areas in the agriculture and pasture interlaced zone: A case study of the Huangqihai Lake Basin in northern China. *Ecological Modelling* 318: 168-176.
- Cusva-Verdugo, A. 2014. Informe de gestión referente a la actualización y análisis de información socioeconómica municipal, diseño y desarrollo de indicadores que permitan realizar los análisis relacionales descriptivos con información cartográfica disponible de humedales a escala 1:100.000. Informe Técnico. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia. 89 pp.
- Disperati, L. y S. G. Pasquale Viridis. 2015. Assessment of land-use and land-cover changes from 1965 to 2014 in Tam Giang-Cau Hai Lagoon, central Vietnam. *Applied Geography* 58: 48-64.
- Fotheringham, A. S., C. Brunsdon y M. Charlton. 2002. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships. Wiley. 284 pp.
- Garzón-Yepes, N. V. y J. C. Gutiérrez-Camargo. 2013. Deterioro de humedales en el Magdalena Medio: un llamado para su conservación. **Fundación Alma.** Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D.C., Colombia. 145 pp.
- Gómez Vivas, M. 2013. Costos y los indicadores de productividad en la ganadería Colombiana. *En: Foro Empresarialización y Competitividad Ganadera.* Oficina de Investigaciones Económicas de Fedegan. Bogotá, D. C., Colombia.
- Hussien Aragaw, K. 2014. Assessment of spatio-temporal changes of wetlands using GIS and RS techniques in Dawa Chefa Area in the Northern Central Ethiopian Highlands. Trabajo de grado. Mekelle University, College of Social Sciences and Languages, Department of Geography and Environmental Studies, Post Graduate Study Programm. 81 pp.
- Ideam. 2010. Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia. Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D. C., Colombia. 72 pp.
- Ideam. 2012. Mapa de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cover Adaptada para Colombia. Escala 1:100.000, Periodo 2005-2009. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D.C., Colombia.
- Ideam. 2015. Estudio Nacional del Agua 2014. Bogota D.C., Colombia. 496 pp.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 2015. Mapa de Humedales Interiores de Colombia, Avances en la Identificación. Escala de trabajo 1: 100.000. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D.C., Colombia.
- Jackson, C. R., J. A. Thompson y R. K. Kolka. 2014. Wetland Soils, Hydrology and Geomorphology. Pp. 23-60. *En: D. Batzer & R. Sharitz (Eds.). Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands (2nd Ed.).* University of California Press. Berkeley, CA.
- Jiang, W., W. Wang, Y. Chen, J. Liu, H. Tang, P. Hou y Y. Yang. 2012. Quantifying driving forces of urban wetlands change in Beijing City. *Journal of Geographical Sciences* 22: 301-314.
- Jiang, P., L. Cheng, M. Li, R. Zhao y Q. Huang. 2014. Analysis of landscape fragmentation processes and driving forces in wetlands in arid areas: A case study of the middle reaches of the Heihe River, China. *Ecological Indicators* 46: 240-252.
- Klemas, V. 2013. Remote sensing of emergent and submerged wetlands: an overview. *International Journal of Remote Sensing* 34: 6286-6320.
- Li, X., X. Deng, y S. Huang. 2010. Evolution of land use policies and its effects on wetlands change in Tianjin Binhai New Area, China. *Procedia Environmental Sciences* 2: 945-952.
- Lin, T., X. Z. Xue y C. Y. Lu. 2007. Analysis of coastal wetland changes using the DPSIR model: A case study in Xiamen, China. *Coastal Management* 35: 289-303.
- Márquez, G. 2001. De la abundancia a la escasez: la transformación de ecosistemas en Colombia. Pp. 321-452. *En: G. Palacio (Ed.). La Naturaleza en Disputa.* Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D. C.
- Nielsen, E. M., S. D. Prince y G. T. Koeln. 2008. Wetland change mapping for the U.S. mid-Atlantic region using an outlier detection technique. *Remote Sensing of Environment* 112: 4061-4074.
- Niu, Z., H. Zhang, X. Wang, W. Yao, D. Zhou, K. Zhao, N. Li, H. Huang, C. Li, J. Yang, C. Liu, L. Wang, Z. Li, Z. Yang, F. Qiao, Y. Zheng, Y. Chen, Y. Sheng, X. Gao,

- W. Zhu, W. Wang, H. Wang, Y. Weng, D. Zhuang, J. Liu, Z. Luo, X. Cheng, Z. Guo y P. Gong. 2012. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008. *Chinese Science Bulletin* 57: 2813-2823.
- Ottinger, M., C. Kuenzer, G. Liu, S. Wang y S. Dech. 2013. Monitoring land cover dynamics in the Yellow River Delta from 1995 to 2010 based on Landsat 5 TM. *Applied Geography* 44: 53-68.
- QGIS Development Team. 2015. QGIS 2.8 Wien. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Recuperado a partir de <http://www.qgis.org>
- R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. Recuperado a partir de <http://www.r-project.org/>
- Ramachandra, T. V., R. Rajinikanth y V. G. Ranjini. 2005. Economic valuation of wetlands. *Journal of Environmental Biology* 26: 439-447.
- Ramírez, F., T. L. Davenport y J. Kallarackal. 2013. Bogotá's Urban Wetlands: Environmental Issues. Pp. 1-8. En: G. Lavigne & C. Cote (Eds.). Colombia: Social, Economic and Environmental Issues. Nova Science Publishers.
- Rebelo, L. M., C. M. Finlayson y N. Nagabhatla. 2009. Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. *Journal of Environmental Management* 90: 2144-2153.
- Ricaurte, L. F., J. Gutiérrez, S. M. Borja, J. Cepeda-Valencia, L. J. Arroyave, M. H. Olaya-Rodríguez, y D. Lara. 2014. Evaluación y mapeo de los impulsores de cambio directos sobre los humedales a escala 1:100.000 en las cuencas priorizadas por el Fondo Adaptación. Informe Técnico. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D. C. 100 pp.
- Rodríguez-Eraso, N., D. Armenteras-Pascual y J. R. Alumbrosos. 2013. Land use and land cover change in the Colombian Andes: dynamics and future scenarios. *Journal of Land Use Science* 8: 154-174.
- Semana. 2015. Destrucción de la Ciénaga Grande no se detiene. *Revista Semana*. Recuperado a partir de <http://www.semana.com/nacion/articulo/destruccion-de-la-cienaga-grande-no-se-detiene/423477-3>
- Sheng, S., C. Xu, S. Zhang, S. An, M. Liu y X. Yang. 2012. Hot spots of wetland vegetation reduction in relation to human accessibility: Differentiating human impacts on natural ecosystems at multiple scales. *Environmental Earth Sciences* 65: 1965-1975.
- SIAC. 2015. Mapa de Coberturas Nacionales. Recuperado 29 de abril de 2015, a partir de <https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=905&conID=1450>
- Song, K., J. Zhao, W. Ouyang, X. Zhang y F. Hao. 2010. LUCC and landscape pattern variation of wetlands in warm-rainy Southern China over two decades. *Procedia Environmental Sciences* 2: 1296-1306.
- Song, G., C. Fu y E. Yong. 2011. The analysis of ecosystem service value's change in Yueqing Bay wetland based on RS and GIS. *Procedia Environmental Sciences* 11: 1365-1370.
- Superintendencia de Sociedades. 2013. Desempeño del sector de minería e hidrocarburos 2008 - 2012. Informe técnico. Superintendencia de Sociedades. Bogotá D.C., Colombia. 32 pp.
- Turner, R. K., J. C. J. M. van den Bergh, T. Soderqvist, A. Barendregt, J. van der Straaten, E. Maltby y E. C. van Ierland. 2000. Ecological-economic analysis of wetlands: Scientific integration for management and policy. *Ecological Economics* 35: 7-23.
- Vilardy, S. P., J. A. González, B. Martín-López y C. Montes. 2011. Relationships between hydrological regime and ecosystem services supply in a Caribbean coastal wetland: a social-ecological approach. *Hydrological Sciences Journal* 56: 1423-1435.
- Vilardy, S. P., Ú. Jaramillo, C. Flórez, J. Cortés-Duque, L. Estupiñán, J. Rodríguez, O. Acevedo, W. Samacá, A. C. Santos, S. Peláez y C. Aponte. 2014. Principios y criterios para la delimitación de humedales continentales. Una herramienta para fortalecer la resiliencia y la adaptación al cambio climático en Colombia (1ª ed.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D. C. 100 pp.
- Wang, Y., J. Knight, L. P. Rampi y R. Cao. 2014. Mapping wetland change of Prairie Pothole region in Bigstone County from 1938 year to 2011 year. Pp. 4343-4346. En: IEEE (Ed.). 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Quebec City, QC, Canadá.
- Wielgus, J. y A. M. Franco. 1997. Development pressures on waterbird habitat in high-Andean wetlands. En W. (Giesen (Ed.), *Wetlands International. Wetlands, Biodiversity and Development* 1: 2-78.
- Yu, Y., A. Suo y N. Jiang. 2011. Response of ecosystem service to landscape change in Panjin coastal wetland. *Procedia Earth and Planetary Science* 2: 340-345.
- Yuan, H. y R. Zhang. 2010. Changes in wetland landscape patterns on Yinchuan Plain, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 17: 236-243.
- Yuan, L. H., W. G. Jiang, Z. L. Luo, X. H. He y Y. H. Liu. 2014. Analysis of wetland change in the Songhua River Basin from 1995 to 2008. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 17: 012125.

- Zedler, J. B. y S. Kercher. 2005. Wetland Resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. *Annual Review of Environment and Resources* 30: 39-74.
- Zhang, R., C. Tang, S. Ma, H. Yuan, L. Gao, y W. Fan. 2011. Using Markov chains to analyze changes in wetland trends in arid Yinchuan Plain, China. *Mathematical and Computer Modelling* 54: 924-930.
- Zhao, H., B. Cui, H. Zhang, X. Fan, Z. Zhang y X. Lei. 2010. A landscape approach for wetland change detection (1979-2009) in the Pearl River Estuary. *Procedia Environmental Sciences* 2 (5): 1265-1278. doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.137

Jorge E. Patiño
Grupo "Research in Spatial Economics"
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia.
Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt
jpatinoq@eafit.edu.co

Análisis espacial cuantitativo de la transformación de humedales continentales en Colombia

Cítase como: Patiño, J. E. 2016. Análisis espacial cuantitativo de la transformación de humedales continentales en Colombia. *Biota Colombiana* 17 (Suplemento 1 - Humedales): 85-105. DOI: 10.21068/c2016s01a05

Recibido: 14 de mayo de 2015
Aprobado: 20 de febrero de 2016