

CAMBIOS DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN VENEZUELA Y SU RELACIÓN CON CAMBIOS EN EL CLIMA

Rafael Rebolledo Wueffer y Anderson Albarrán Torres*

Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico,
Centro de Procesamiento Digital de Imágenes. *rebolledo.wueffer@gmail.com.

RESUMEN

Prácticas sustentables de desarrollo señalan la importancia que tiene la conservación y la deforestación evitada de los bosques para enfrentar el cambio climático. Esta investigación se orienta a estudiar esta relación a partir de la identificación y el análisis comparativo de cambios en la cobertura boscosa de Venezuela y cambios en el clima. El estudio se diseñó para toda Venezuela en un periodo de observación de los últimos 20 años del siglo XX. La detección de cambios en la cobertura boscosa se basó en el análisis temporal de imágenes de satélite de la serie Landsat aplicando principios de morfología binaria y patrones de fragmentación en la dinámica y el modo de cambio. Para los cambios en el clima se trabajó con superficies climáticas generadas por interpolación espacial del modelo de circulación global UNKO-HAD-CM3 correspondiente al experimento siglo XX (20c3m), calibradas y validadas con base en registros históricos de temperatura media mensual. Finalmente, ambas metodologías se integran en un análisis comparativo en términos de coexistencia espacio-temporal para identificar las relaciones que potencialmente se establecen entre ambos cambios. De los resultados obtenidos se concluyó que durante los últimos 20 años del siglo XX existió relación entre los cambios en la cobertura boscosa y los cambios en el clima, y que dicha relación es distinta para distintos tipos de bosque.

Palabras clave: fragmentación de bosques, cambio climático, morfología binaria.

Changes in forest coverage of Venezuela and its relationship with climate changes

Abstract

Sustainable development practices indicate the importance of forest conservation to address Climate Change. This research presents a first approach to identify changes in forest cover in Venezuela and changes in climate. The study was divided into two parallel methodologies, one to identify and characterize changes in forest cover and another to identify and characterize changes in the weather pattern for a given time series (last 20 years of the twentieth century), in the first case was based on the temporal analysis of satellite images from the Landsat series, from binary morphology establishing fragmentation patterns in the dynamics and mode change. In the latter case, climatic surfaces was used spatial interpolation generated by global circulation model UNKO-HAD-CM3, specifically for 20c3m outs, calibrated and validated based on historical records of the past 20 years of monthly mean temperature, from weather stations. Finally, both methods are integrated into a comparative analysis in terms of spatio-temporal coexistence to identify potential relationships that exist between the two changes. From the results obtained it was concluded that there is a general relationship between the identified maximum changes in forest cover and climate variability in the average temperature for the period studied.

Keywords: landscape fragmentation, forests, climate change, binary morphology.

INTRODUCCIÓN

Como ecosistema, los bosques juegan un importante rol en el cambio climático, por un lado como reguladores del clima a nivel local y por otro como una alternativa cierta de mitigación (Dyson, 1977; IPCC, 1996; FAO, 2003; 2011). Muchas hipótesis acerca de las causas del calentamiento global ven en la pérdida de bosques un promotor importante de este fenómeno por la reducción de la capacidad natural de secuestro de carbono y el albedo inducido por el cambio de uso de la tierra, donde ellos existían (Hernández, 2008). En cualquier caso es evidente la relación entre ambos aspectos. Para Venezuela el tema es particularmente sensible, pues cerca del 50% del territorio nacional está cubierto por bosques naturales tropicales, pluri-estratificados y mega-diversos que influyen significativamente en las presiones de ocupación territorial para el desarrollo (Plonczak, 1997).

De este modo, cualquier iniciativa científica que estudie la forma como los bosques han respondido a cambios en el clima durante los últimos años, podría ayudar a establecer escenarios de afectación del cambio climático a la cobertura boscosa del país y en consecuencia servir de base para la formulación de políticas coherentes para el manejo sustentable de los bosques, como medida de adaptación ante el cambio climático en Venezuela.

¿Por qué estudiar la cobertura boscosa? ¿Por qué pretender relacionarla al cambio climático a través de un estudio retrospectivo? Porque siendo el cambio climático un fenómeno global, éste solo puede ser reconocido a partir de la manifestación de sus efectos. Como lo demuestran estudios previos, la cobertura boscosa ha sido por excelencia un indicador típico para el estudio de cambios en sistemas ambientales complejos, por lo general el bosque refleja las condiciones ambientales a la que es sometido, además tiene la particularidad de ser un fenómeno fácilmente trazable a partir de la interpretación de imágenes de satélite, por lo que los cambios en él se evidencian mucho mejor (Chuvioco, 1998; Vargas *y col.*, 2002; Albarrán, 2008; Molina y Albarrán, 2012). Es allí donde radica la importancia de la detección de cambios como técnica para la evaluación de los efectos del CC sobre el bosque, mediante el análisis multi-temporal de una serie histórica de imágenes compatibles que al ser relacionados con el monitoreo climático correspondiente al periodo estudiado, puede ser la base para establecer relaciones entre los cambios en la cobertura boscosa y cambios en el clima.

Hasta ahora, se sabe que la evolución de la cobertura vegetal está determinada por un gran número de factores tanto físicos, como biológicos y antrópicos. Los factores climáticos que influyen sobre la vegetación son la temperatura del aire, la evaporación, la precipitación, y

la radiación solar (Mora e Iverson, 1998; Garatuza, *y col.*, 1998); tales procesos le infieren un comportamiento cíclico a la dinámica de la fracción de la vegetación que se manifiesta en forma de patrones espacio-temporales explícitos y en cambios de la cobertura terrestre debidos a modificaciones en su estructura, todo ello a escala regional (Albarran, 2008).

A nivel local, se manifiestan otro tipo de cambios debido a transformaciones de la cobertura terrestre en las zonas de producción agropecuaria. Paralelamente, el estado fenológico o de desarrollo de las diferentes coberturas vegetales tiene un papel preponderante en los patrones espacio-temporales observables (Mora e Iverson, 1998), otros factores que están relacionados con la actividad vegetal son los generados por las variaciones climáticas, fundamentalmente las de carácter anual: ciclos térmicos y pluviométricos que conforman estaciones frías y/o secas (paro biológico y escasa actividad vegetal) y cálidas y/o húmedas (mayor actividad fisiológica y transferencia radiativa planta-atmósfera). Sin embargo, las precisiones relativas a estudios de tipo local escapan del alcance de este artículo, por limitaciones propia de la tecnología implementada.

La variabilidad climática origina contrastes en la cobertura vegetal en las estaciones del año, debido a su gran diversidad de comunidades y cubiertas vegetales que responden con distintos ciclos fenológicos anuales a condiciones climáticas estacionales (Walter, 1979; citado por Lasanta *y col.*, 2004). Si bien este estudio se basa en variabilidad climática y no en cambio climático, su objetivo es estudiar la manera en como “cambios en el clima” se relacionan con alteraciones en la cobertura boscosa, independientemente de la naturaleza de estos cambios, por ello su resultados puede ser utilizados en el futuro para proyectar alteraciones boscosas ante las condiciones establecidas por escenarios de cambio climático.

La pérdida de hábitats y la fragmentación del paisaje se consideran las principales amenazas que afectan a la diversidad biológica (Harris, 1984). Conservacionistas, planificadores y ecólogos se refieren a la pérdida de hábitats y al aislamiento de los hábitats con el término fragmentación (Collinge, 1996). El estudio del fenómeno de fragmentación del paisaje implica métricas para cuantificar los patrones espaciales y configuración del paisaje. A los efectos de este proyecto, la cobertura de bosques interpretada a partir de imágenes de satélite constituye un tipo de hábitat único y suficientemente diferenciable como para ser estudiado con técnicas de fragmentación del paisaje por medio de un análisis multi-temporal, incorporar estas técnicas de análisis, en particular lo relativo a las métricas, contribuye en mucho a la finalidad de sistematizar el estudio del cambio observado en esta cobertura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se estructuró mediante dos metodologías paralelas; la primera para identificar y caracterizar los cambios en la cobertura boscosa y la segunda, para identificar y caracterizar los cambios en el patrón climático para una serie temporal dada (últimos 20 años del siglo XX); finalmente, ambas metodologías se integraron en un análisis comparativo en términos de coexistencia espacio-temporal para determinar la naturaleza de las relaciones que potencialmente se establecen entre ambos cambios (Figura 1). Los detalles de cada estrategia metodológica son los siguientes:

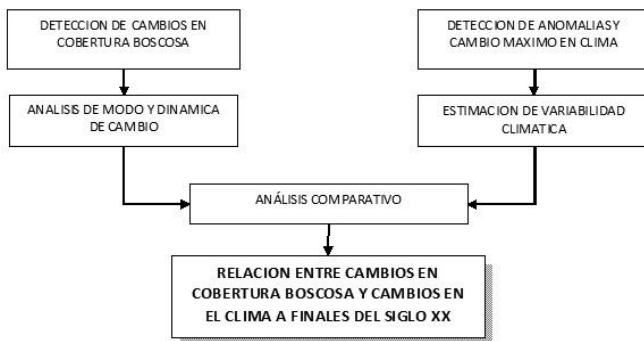


Figura 1. Esquema metodológico de la investigación.

Cambios en la Cobertura Boscosa. Para el caso del cambio en la cobertura boscosa, el estudio se basó en el uso de imágenes de satélite de la serie Landsat (<http://landsat.gsfc.nasa.gov>), para el período comprendido entre 1984 a 2002, en total se recopilieron 179 imágenes del territorio nacional, las cuales fueron corregidas geométricamente y pre-procesadas de acuerdo a las características originales, se construyeron las series temporales según la estacionalidad climática de Venezuela, se identificaron y aislaron los lotes boscosos, dividiendo el área de estudio en cinco regiones, conformadas a su vez por diferentes eco-regiones. Posteriormente, para cada serie se realizó un análisis de detección de cambios y los resultados se analizaron morfológicamente para establecer patrones de fragmentación en la dinámica y el modo de cambio experimentado (Rebolledo, 2009a; 2009b). Finalmente, se caracterizaron los lotes boscosos de acuerdo con este criterio y se asociaron a las unidades boscosas establecidas en el mapa de vegetación de Venezuela elaborado por Otto Huber y Clara Alarcón en 1988 a escala 1:2000000 y editado en 1998. Todo el procedimiento esquematizado correspondiente a esta metodología se puede apreciar en la Figura 2.

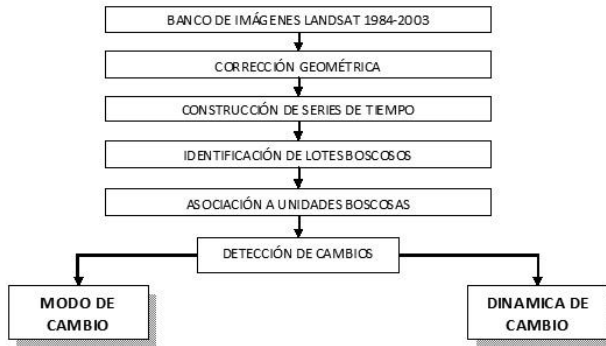


Figura 2. Flujograma de procedimiento del estudio de cambio en cobertura boscosa.

- (a) **Modo de Cambio.** El modo de cambio enfoca el análisis desde la perspectiva estructural de la unidad de análisis y permite estimar cuán íntegra permanece la unidad a través del tiempo. De acuerdo con este criterio, el modo de cambio de una unidad boscosa puede ser de tres tipos: Agregación, Disgregación y Homogeneidad. La Agregación representa la reunión o agrupamiento de elementos de la misma clase con tendencia a disminuir la cantidad total de lotes. La Disgregación, por el contrario, indica la degradación, ruptura y dispersión de elementos de la misma clase, con la tendencia a aumentar la cantidad de lotes aunque sean de menor tamaño. Finalmente, la Homogeneidad ocurre cuando independientemente del aumento y/o disminución de los lotes boscosos, éstos permanecen íntegros en cuanto a su forma y cantidad.
- (b) **Dinámica de Cambio.** La dinámica de cambio es un criterio de análisis que se orienta a identificar si el cambio observado supone un desplazamiento temporal de la unidad de análisis. De acuerdo con este criterio, la dinámica de cambio de una unidad boscosa puede ser de tres tipos: Crecimiento, cuando la unidad boscosa experimenta una expansión aumentando su tamaño original; Decrecimiento, cuando la unidad boscosa experimenta una contracción, disminuyendo su tamaño y Estático, cuando las dimensiones se mantienen y en algunos casos se experimenta una relocalización geográfica del lote boscoso, que en la mayoría de los casos es imperceptible.
- (c) **Análisis de Modo y Dinámica de Cambio.** Tanto el modo de cambio como la dinámica de cambio se definen espacialmente a partir del estudio de la diferencia simétrica, mientras que los valores morfológicos (área, perímetro y compacidad) asociados a cada unidad, permiten sistematizar estas cualidades. Una vez determinado el modo y la dinámica de cambio de las unidades boscosas para cada región definida, se integran a fin de identificar las aéreas de mayor cambio

“positivo” y/o “negativo” durante el periodo estudiado, para ello se toman como entrada los dos resultados parciales de estos procedimientos y se valoran cualitativamente para poder relacionarlos espacialmente, de acuerdo con la clave mostrada en la Figura 3.

		DINAMICA		
		Crecimiento (1)	Estático (2)	Decrecimiento (3)
MODO	Agregación (1)	AGR/CRE (2)	AGR/EST (3)	AGR/DEC (4)
	Homogéneo (2)	HOM/CRE (3)	HOM/EST (4)	HOM/DEC (5)
	Disgregación (3)	DIS/CRE (4)	DIS/EST (5)	DIS/DEC (6)

Figura 3. Valoración cruzada cualitativa de modo y dinámica de cambio.

Luego de valorar ambas entradas se hace efectivo el proceso de integración por suma produciendo una nueva escala que varía de dos (2) a seis (6), (el valor cero “0” representa las zonas sin información), en función de las posibles combinaciones de las escalas entrantes que da como resultado la valoración cruzada; por ejemplo, el valor más alto (6) corresponde a cambios “negativos” (degradación/decrecimiento), valores medios (3,4,5) corresponde a cambios “homogéneos” y valores bajos (2) corresponden a cambios “positivos”. El Análisis de Cambio culmina con el registro de la información del análisis de cambio dentro de la tabla atributiva del vector (shapefile) de lotes boscosos.

Cambios en el Clima. Para el caso del clima se trabajó con superficies climáticas generadas por interpolación espacial de un modelo de circulación global generalizado. En este caso se tomó la salida del Modelo UNKO-HAD-CM3 del 20c3m; servida en el dataset CRU TS 2.1(2). (2): Con base en los resultados del modelo UNKO-HAD-CM3, el CRU (Climate Research Unit) ha producido y publicado con fines de investigación el dataset CRU TS 2.1. El CRU es un centro de investigación de la Universidad de East Anglia, ubicado en Inglaterra. Este producto está respaldado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) al ser parte de las referencias de su 4to Informe Técnico. Todos los derechos de propiedad de la data del CRU TS 2.1 pertenecen a su creador Dr. T. D. Mitchell y pueden ser usados según su licencia con fines científicos y educacionales no comerciales.

En esta investigación, la salida del modelo UNKO-HAD-CM3 fue calibrada y validada con base en registros históricos de los últimos 20 años, provenientes de estaciones meteorológicas del Sistema Integrado Nacional de Información Hidrológica y Meteorológica (SINAIHME). Producto del

análisis de validación se optó por tomar sólo la temperatura media mensual (TMM) como indicador climático, pues la precipitación que ofrecía las salidas del UNKO-HAD-CM3 para el siglo XX no eran lo suficientemente compatibles con la referencia de los registros históricos del SINAIHME. Escogida la TMM como indicador, se diseñó una estrategia metodológica de dos enfoques, basada en la identificación de anomalías y la determinación de cambio máximo para hacer efectivo el estudio de variabilidad climática en Venezuela durante el siglo XX (Figura 4).



Figura 4. Flujograma de procedimiento del estudio de variabilidad climática.

- (a) Identificación de Anomalías Climáticas. En su concepto más elemental, una anomalía se asocia a un dato cuyo valor no contribuye a una distribución normal típica; sin embargo, en su concepción más amplia, este concepto puede ser aplicado a cualquier tipo de distribución típica. Asumiendo el hecho de que en estudios climáticos las condiciones estacionales-espaciales son constantes, cualquier cambio en los indicadores climáticos implica una alteración en condiciones estacionales y espaciales; lo cual, en teoría, no es la norma. En ese sentido, la distribución de frecuencia de cualquier indicador climático para el mismo sitio durante la misma época “debería” seguir una distribución normal típica alrededor de la media. Así, en este caso, las anomalías climáticas corresponden a los valores de temperatura que contribuyen menos con esta condición. Desde el punto de vista espacial, las anomalías climáticas se identifican como localidades en donde se experimentan la mayor cantidad de alteraciones de esta naturaleza.
- (b) Identificación de Cambio Máximo. El otro componente en el estudio de variabilidad climática es la identificación de máximo cambio. El cambio máximo acumulado es un indicador que registra la cantidad absoluta de cambios que ha tenido una celda a lo largo del periodo de observación. Los sitios de máximo cambio son en consecuencia

aqueellos lugares donde se registra elevados valores de cambio, respecto al entorno.

- (c) Estimación de la Variabilidad Climática. la estimación de la variabilidad climática se establece como una relación funcional de las anomalías climáticas y el cambio máximo. Para ello se toman como entrada los dos resultados parciales de estos procedimientos, y se homologan cualitativamente para poder relacionarlos espacialmente. Luego de homologar ambas entradas a escalas cualitativas de cuatro niveles por quiebres naturales se hace efectivo el proceso de integración produciendo una nueva escala de siete niveles en función de las posibles combinaciones de las escalas cualitativas entrantes (Figura 5).



Figura 5. Escala cualitativa de variabilidad climática.

Así, toda celda que sea clasificada como de Altamente anómala y además incluya la categoría de Muy Alta cantidad de cambios, sería una celda ALMA, en consecuencia entraría en la categoría de Muy Alta de la escala integrada de siete niveles. Este procedimiento se repite para todas las celdas para cada uno de los meses. Finalmente, se tendrán solo 12 mapas (uno por cada mes) que representa la variabilidad del clima entendida como la integración de la cantidad de cambio acumulada y la presencia de anomalías climáticas durante el periodo de observación (1980-2000).

Análisis Comparativo. Una vez identificado el cambio en la cobertura boscosa a partir de la integración del modo y dinámica de cambio, y registrado éste en la tabla atributiva de las unidades boscosas del mapa de vegetación de Venezuela (1998), se realizó la rasterización de los resultados a un tamaño de pixel de 0,125°, a fin de cruzarlos con el producto de la estimación de variabilidad climática acumulada, que resulta de la superposición de los 12 mapas obtenidos (uno por cada mes). Ambos productos son indexados bajo el mismo criterio, para evitar distorsiones por escala, utilizando la siguiente ecuación:

$$I = X(i) / X_{max}(I)$$

donde I corresponde al índice, X(i) es el valor de cada pixel y Xmax corresponde al valor máximo de cambio.

Luego se realizó una integración espacial por superposición de los dos sub-productos finales y se evidenciaron las áreas que presentaban cambios en común haciendo énfasis en los que se presentaron como cambios “negativos”. Finalmente, con base en la revisión documental y conocimiento de las áreas de estudio se establecieron las relaciones entre cambios de la cobertura boscosa y cambios en el clima a finales del siglo XX.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cambios en la Cobertura Boscosa. El análisis de cambio se realizó con base al uso de imágenes de satélites de la serie Landsat entre los años 1984 y 2002 (Figura 6). Considerando el *path* y *row* se tomaron 52 series temporales correspondientes al número de escenas que cubren el país, en total de las 179 imágenes recopiladas, para la composición de las series se utilizaron 143 imágenes, bajo el criterio estacionalidad climática garantizando así que el análisis se realizará en los mismos meses.

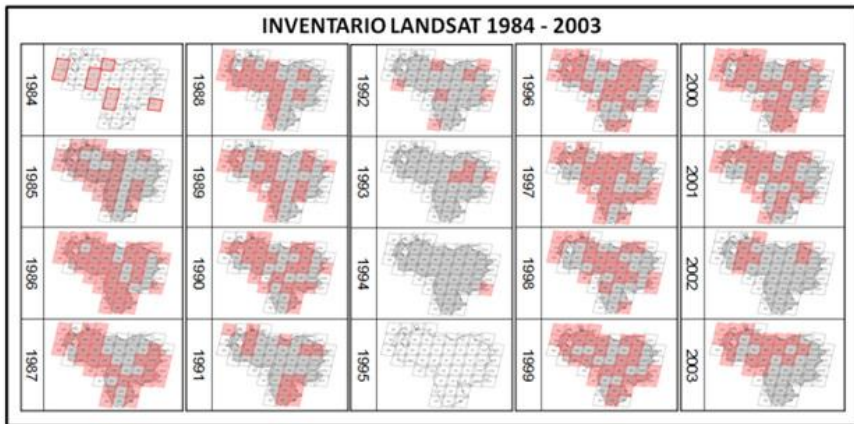


Figura 6. Disponibilidad de imágenes de la serie Landsat por escenas por año.

A efectos de agilizar las labores del proyecto de manera que se pudiera trabajar con varios equipos de analistas y que a su vez, los resultados parciales se pudieran ir incorporando de manera oportuna a etapas consecuentes del estudio, se establecieron cinco sub-áreas de estudio, las cuales incluyen diferentes ecorregiones, Como resultado se conformaron las siguientes cinco sub-áreas de trabajo: (1) *Occidente*, que incluye las ecorregiones Cordillera de Los Andes, Depresión del Lago de Maracaibo y el Sistema de Colinas Falcón-Lara, (2) *Centro*, que se corresponde con la Cordillera de la Costa sección central, (3) los *Llanos*,

representado por la ecorregión del mismo nombre, (4) *Oriente*, que comprende las ecorregiones del Delta del Orinoco y la Cordillera de la Costa sección oriental, y (5) *Sur*, representada por la ecorregión del Escudo Guayanés (Figura 7).

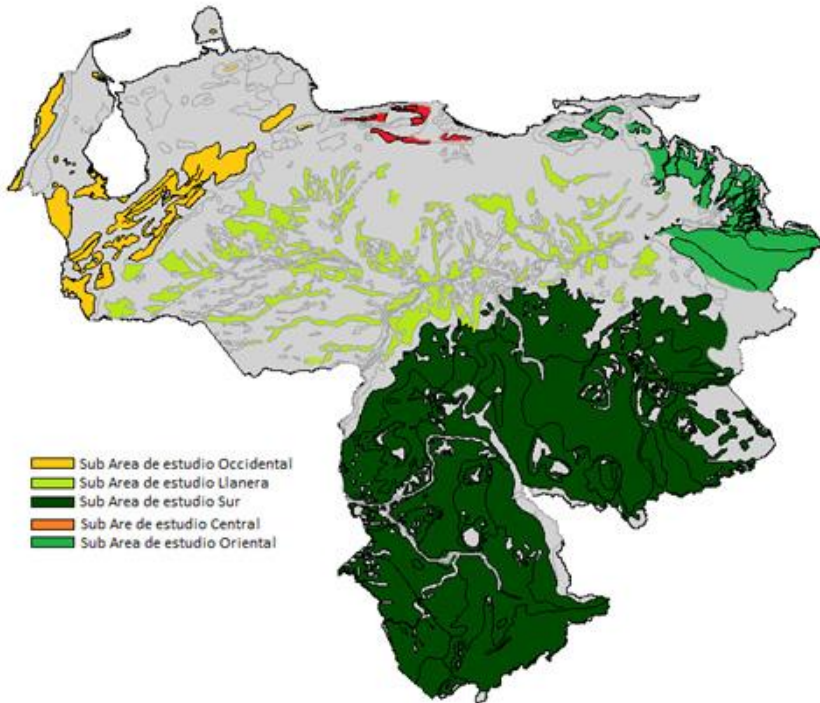


Figura 7. Sub-áreas de estudio.

En el análisis de modo de cambio hubo mayor disgregación de las unidades boscosas correspondientes al área de los llanos, en especial los llanos altos occidentales, destacando las reservas forestales de Ticoporo y San Camilo. Por su parte, en el área occidental se identificaron cambios de disgregación principalmente en las unidades boscosas del piedemonte, tanto llanero como lacustre, de la cordillera de Mérida, sin embargo, en el área occidental también se identificó agregación, correspondiente a las unidades boscosas deciduas y semi-deciduas de la región (Sierra de Perijá y Sistema Falcón-Lara). Esta particularidad de agregación también se encontró en las unidades boscosas semi-deciduas del área central; las áreas oriental y sur resultaron ser las más homogéneas en cuanto al modo de cambio, e identificados casos muy puntuales de disgregación y agregación (Figura 8).

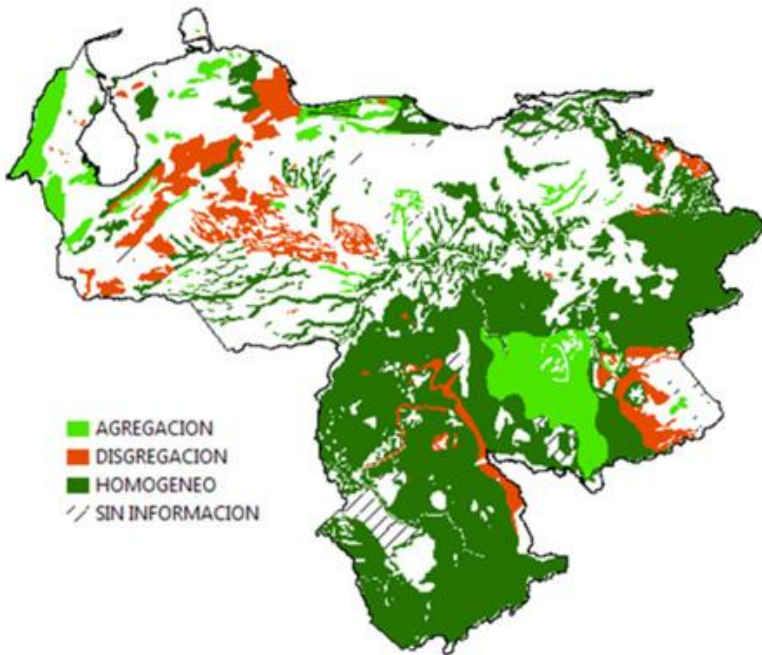


Figura 8. Modo de cambio.

Con relación al análisis de dinámica de cambio, en el área de los llanos se identificó decrecimiento en las unidades boscosas de los llanos altos occidentales y al norte de los llanos centrales (norte del estado Guárico) mientras que en los llanos orientales se pudo apreciar crecimiento de las unidades boscosas que comprenden esa zona. Por su parte, en el área occidental se experimentó decrecimiento en las unidades boscosas del piedemonte, tanto llanero como lacustre, de la cordillera de Mérida; sin embargo, también se comprobó crecimiento, correspondiente a las unidades boscosas deciduas y semi-deciduas de la región (Sierra de Perijá y Sistema Falcón-Lara) manteniéndose estática la dinámica de cambio en las demás unidades. En el área central no se observó decrecimiento, manteniéndose gran parte de las unidades boscosas estáticas a excepción de las unidades deciduas y semi-deciduas que de la cordillera de la costa que presentaron crecimiento. En el área oriental a nivel general, el comportamiento de la dinámica fue estático, a pesar de casos muy puntuales en la zona de manglares del delta del río Orinoco en las que se evidenció decrecimiento. Asimismo, en el área sur el comportamiento de la dinámica de cambio para todas las unidades boscosas fue estático, siendo

la zona más homogénea en cuanto a este criterio en todas las áreas estudiadas (Figura 9).

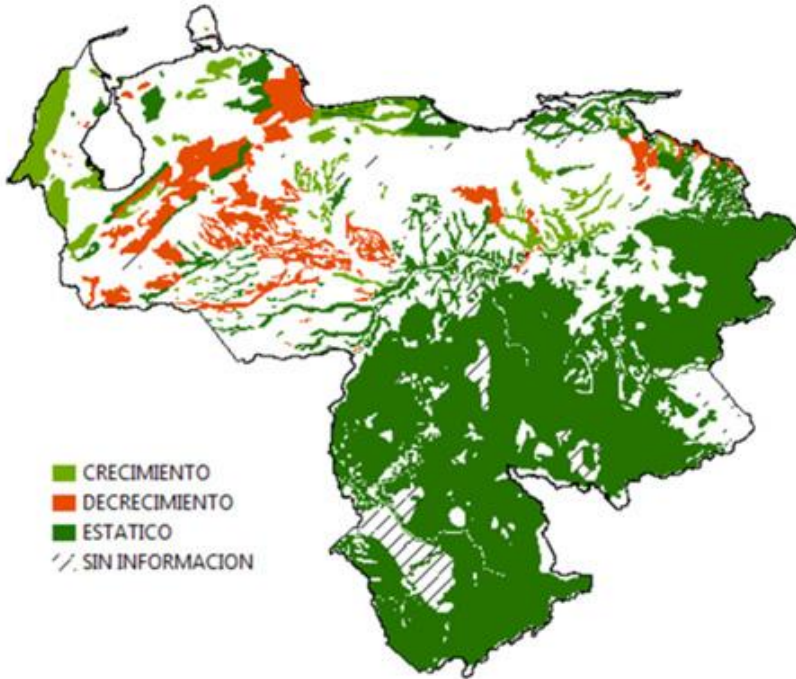


Figura 9. Dinámica de cambio.

El análisis de modo y dinámica de cambio resultó de la integración de ambos criterios permitiendo así identificar las unidades boscosas que presentaron mayores cambios “negativos” y “positivos”, así como, las zonas de no cambio o homogéneas, según la escala producto de la valoración cruzada que varía de 0 a 6 .

A nivel general se encontró una alta correspondencia entre los criterios evaluados; por ejemplo, las zonas que presentaron disgregación en la evaluación del modo de cambio presentaron a su vez decrecimiento en la evaluación de la dinámica de cambio. Por lo tanto, según la valoración establecida para identificar los cambios, las unidades boscosas que se identificaron con cambio negativo corresponden al área de estudio llanera, especialmente los llanos altos occidentales.

En el área occidental se evidenció un cambio positivo en las unidades boscosas de la sierra de Perijá, lo cual resulta paradójico debido a la alta presión agropecuaria que presenta la zona. Mientras que en la zona central los cambios fueron homogéneos, a excepción de las unidades semi-decíduas de la cordillera de la costa que se evidencian cambios positivos. Además, producto de la integración, se comprobó pérdida de la cobertura boscosa en lugares puntuales en el oriente del país (Turimiquire y al este del estado Monagas).

Por su parte, en el área de estudio sur, en términos generales se identificó un comportamiento homogéneo sin cambios de modo y dinámica representativos, salvo cambios negativos en las unidades localizadas en la zona de contacto con los llanos en el piedemonte noroccidental de la penillanura del norte y los bosques sub-siempre verdes del río Ventuari y cambios positivos en la cuenca alta del río Paragua (Figura 10).

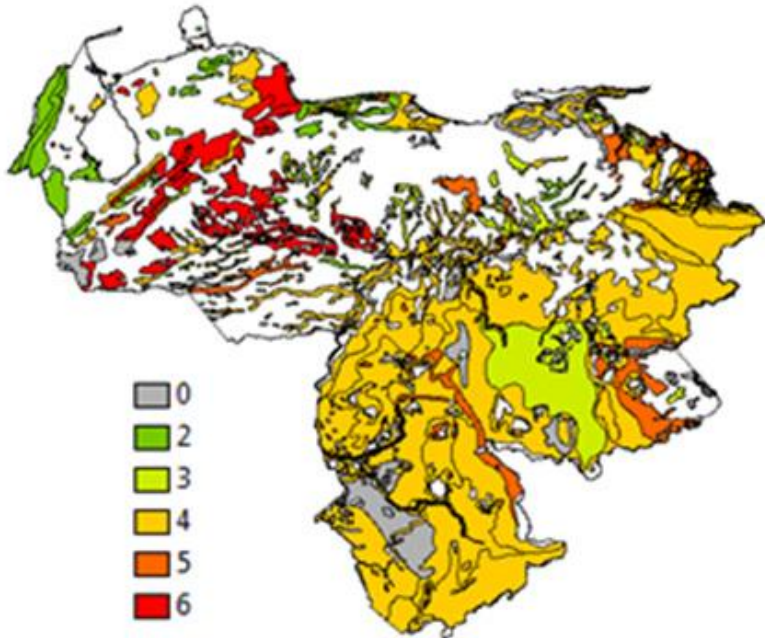


Figura 10. Resultado de la integración del análisis de Modo y Dinámica de cambio. 0 representa las zonas sin información, (2) corresponde a cambios "positivos", (3, 4,5) corresponde a cambios "homogéneos" y (6) corresponde a cambios "negativos".

Cambios en el Clima. Como resultado de la calibración y validación de los datos de salida del modelo UNKO-HAD-CM3 con base en registros históricos de los últimos 20 años provenientes de estaciones meteorológicas del Sistema Integrado Nacional de Información Hidrológica y Meteorológica (SINAIHME) se realizó el estudio con la temperatura media mensual, para identificar anomalías y cambios máximos durante el periodo estudiado que permitió identificar la variabilidad climática.

De la aplicación del criterio de anomalías climáticas se identificaron las anomalías acumuladas para cada mes a lo largo de 20 años de observación, considerando como anómalos los lugares donde se presentaron cambios en tres oportunidades a lo largo del periodo de observación; en la Figura 11 se observa la totalidad de anomalías acumuladas por cada celda del área de estudio durante el periodo de observación, independiente de la del mes en que ocurren. Las celdas mostradas en color más intenso equivalen a los lugares donde se experimentan más anomalías recurrentes, registrándose un máximo de 19 en 20 años. El menor caso fue 4/20 anomalías.

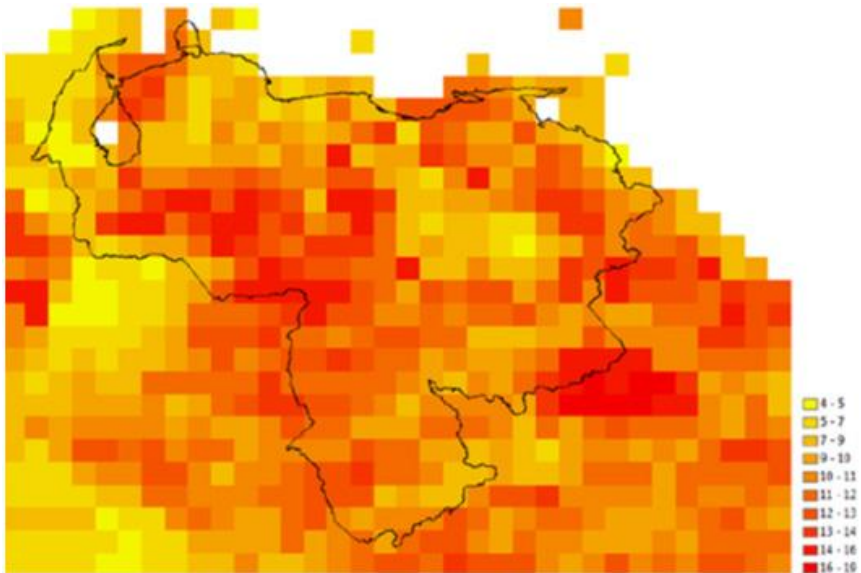


Figura 11. Anomalías de temperatura media acumuladas en Venezuela desde el año 1981 hasta el 2000.

De acuerdo con el resultado obtenido de este estudio, los meses donde se identifican más casos anómalos recurrentes en un periodo de

20 años son Enero, Mayo y Junio aun cuando en la mayoría de los casos la presencia de anomalías es baja. Por lo cual, resulta interesante observar que la región donde se presentó con mayor frecuencia casos anómalos fue los llanos centro occidentales, desde la confluencia del río Arauca con el Orinoco, la zona del piedemonte andino-llanero y la confluencia del río Caroní con el Orinoco. Con cierto nivel de significancia se destacaron además los alrededores del estrecho de El Tablazo y la diagonal que se forma desde el occidente del estado Sucre hasta los alrededores de Ciudad Guayana a todo lo largo del eje principal del estado Monagas (llamada acá la Diagonal de Monagas).

El cambio máximo registra los resultados del estudio de comparación diferenciada sucesiva y acumulativa aplicado a los datos de temperatura; los lugares con mayor cambio sucesivo acumulado se expresan en color morado intenso, mientras que los sitios donde el valor de temperatura permanece más constante a lo largo del periodo de observación se observan en color lila claro (Figura 12). Las unidades del conjunto de mapas temáticos son 0,1°C acumulados en los 20 años de observación (1981-2000).

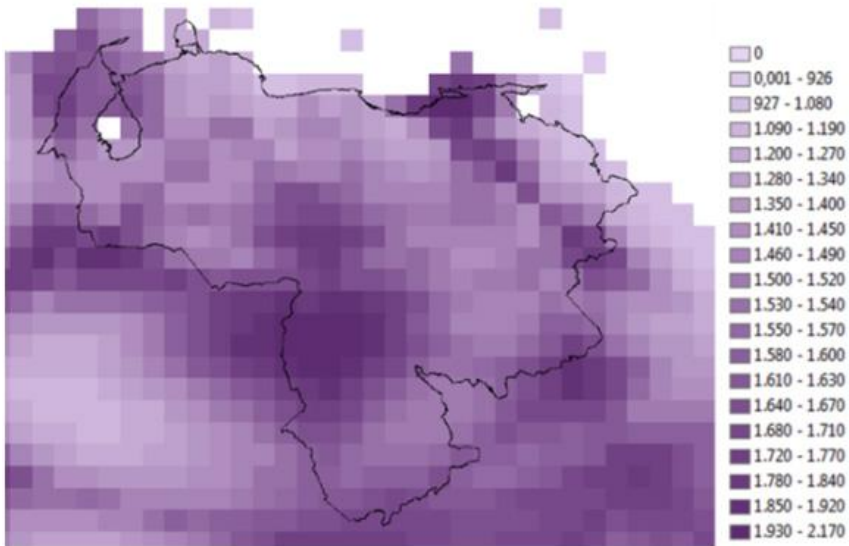


Figura 12. Cambio máximo acumulado de temperatura media en Venezuela desde el año 1981 hasta el 2000.

El mes donde se observó la mayor cantidad de cambio desde 1981 hasta el 2000 fue enero, con una diferencia significativa respecto a los

demás meses del año. Es interesante destacar que la región donde se experimentan estas elevadas tasas de cambio en enero, es la misma donde se observaron anomalías, es decir la región de los llanos centrales desde la confluencia del Meta/Orinoco hasta el sur del estado Guárico. Por otro lado, también se destacaron la Diagonal de Monagas y los alrededores del estrecho de El Tablazo como áreas débilmente anómalas.

Finalmente, tal como se describió en la metodología, la variabilidad climática es la integración espacial de criterios de anomalía climática y máximo cambio acumulado. Para analizar espacialmente la variabilidad climática independientemente de los meses en que ocurren, se reúne en un valor acumulado las variabilidades mensuales estimadas a partir de las anomalías y los cambios máximos de la temperatura media durante el período de observación (Figura 13).

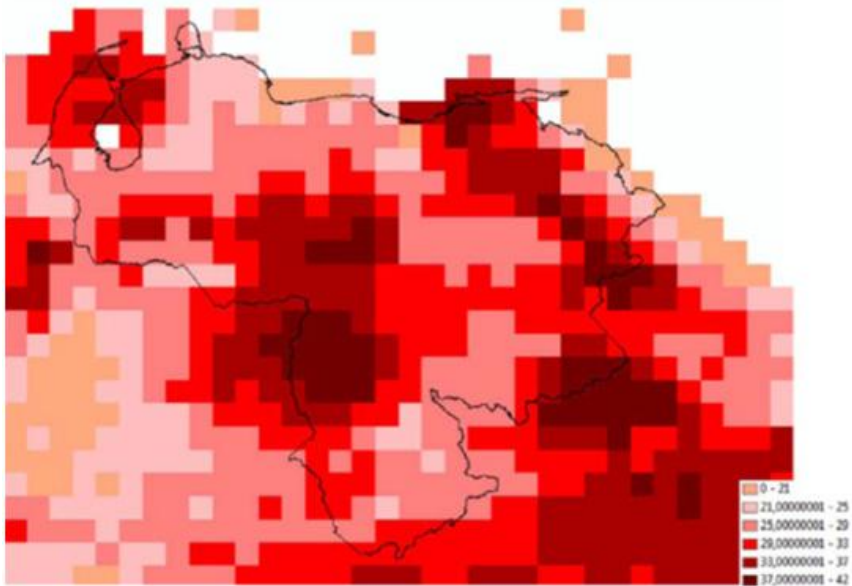


Figura 13. Variabilidad climática acumulada de temperatura media en Venezuela desde el año 1981 hasta el 2000.

En los resultados de variabilidad climática se observó un fenómeno interesante producto del comportamiento regional para diferentes épocas del año. Es así como durante los meses de abril-mayo-junio, la región de los llanos centro-occidentales fue bastante activa, pues se observó alrededor de ella una significativa acumulación de casos altamente variables. Luego durante los meses de septiembre-octubre-noviembre el

énfasis se apreció en la Diagonal de Monagas, donde los alrededores del estrecho de El Tablazo fueron especialmente activos en junio-julio-agosto y luego en noviembre. En general el análisis del resultado acumulado mostró tres polos de variabilidad bien destacados: el estrecho del Tablazo, la región desde el sur de los llanos centrales hacia la confluencia de los ríos Meta/Orinoco y la Diagonal de Monagas.

Análisis comparativo. Una vez identificados los cambios en la cobertura boscosa y la variabilidad en el clima, producto de la indexación de ambos productos se obtuvo el mapa global de cambios, donde el valor uno “1” representó las zonas en las cuales la relación entre el cambio de las variables estudiadas presentó la mayor correspondencia (Figura 14).

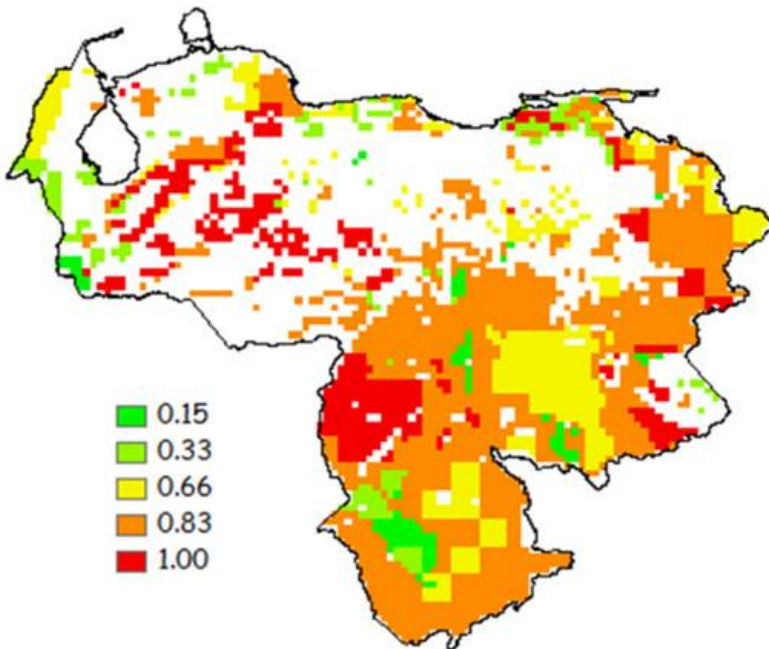


Figura 14. Índice de Cambio (I), representando la mayor correspondencia entre los cambios de la cobertura boscosa y el clima durante el periodo estudiado.

Al realizar el análisis comparativo se observó una alta correspondencia entre los mayores cambios identificados en ambas variables, destacando principalmente la zona centro-occidental de los llanos, el piedemonte andino-llanero de la cordillera de Mérida, la zona de contacto entre los llanos orientales y las unidades boscosas del delta

del Orinoco, así como, el macizo de Turimiquire. Además, se demostró en el área sur una correspondencia en el cambio identificado con las zonas de contacto y/o transición entre los llanos en la parte occidental y la Gran Sabana en la parte oriental.

Es relevante destacar que si bien en todos los casos de cambio máximo “negativo” existió correspondencia con lo observado en ambas variables, para el resto de las condiciones la variabilidad climática tiene mayor influencia sobre el resultado final; por ejemplo, en cuanto a la cobertura boscosa el área sur resultó ser en términos generales una región homogénea y estable en cuanto al modo y dinámica de cambio, mientras que en el clima se presentó una tendencia a presentar alta variabilidad climática. En cuanto a las zonas menor cambio destaca las unidades boscosas deciduas y semi-deciduas de las áreas montanas y sub-montanas, principalmente de la sierra de Perijá y la cordillera de la Costa.

En función a los resultados obtenidos luego de la aplicación de los criterios de evaluación, se puede concluir de manera general que existe relación entre los cambios máximos identificados en la cobertura boscosa y la variabilidad climática de la temperatura media para el período estudiado.

Para la cobertura boscosa, las unidades que sufrieron más cambio negativo correspondieron al área de estudio llanera, sobre todo los llanos altos occidentales. Se produjo pérdida de la cobertura boscosa en lugares puntuales en el oriente del país (Turimiquire y al este del estado Monagas). El área de estudio sur, en términos generales tiene un comportamiento homogéneo sin cambios representativos salvo las unidades localizadas en la zona de contacto con los llanos en el piedemonte noroccidental de la penillanura del norte y la zona de contacto con la Gran Sabana. En el área occidental hubo un cambio positivo en las unidades boscosas de la sierra de Perijá, lo cual resulta paradójico debido a la alta presión agropecuaria que presenta la región. Finalmente, es importante mencionar que probablemente la generalización producto de la asociación a las unidades del Mapa de Vegetación alteró en cierta manera los resultados obtenidos, sin embargo, se consideran aceptables.

En el caso de la variabilidad climática, teniendo en cuenta que las anomalías expresan en este análisis los valores que menos contribuyen con la normalidad de los datos climáticos, es evidente su contribución a un estudio de variabilidad. Por su parte, el criterio de cambio máximo aporta otro elemento importante al estudio de la variabilidad y es que en función a este análisis es posible estimar la magnitud de la variabilidad experimentada durante el periodo de observación, el cambio máximo identifica, por ejemplo, los lugares han experimentado mayor cantidad de cambios en lo que se supone debería ser el mismo valor. Por lo tanto,

en general el análisis del resultado acumulado muestra tres polos de variabilidad bien destacados: (a) El estrecho del Tablazo, (b) La región desde el sur de los llanos centro-occidentales hacia la confluencia de los ríos Meta/Orinoco, y (c) La Diagonal de Monagas.

Finalmente, tal como se mencionó anteriormente de la integración de ambas variables, los llanos representó el área con el cambio más significativo y de mayor relación, en especial, los llanos altos centro-occidentales. Justamente aquellos donde la actividad agropecuaria ha sido más intensamente difundida desde mediados del siglo XX. A nivel general, el estudio puede representar una base para la determinar aéreas susceptibles a cambios en la cobertura boscosa por la influencia de cambios en el clima y viceversa; sin embargo, estudios en este sentido se podrían referenciar los resultados en una dimensión temporal que permitiera establecer relaciones de precedencia o consecuencia, como alternativa para evaluar la causa-efecto de los cambios identificados. Aunque resulta obvio que ésto constituye el próximo nivel, desarrollar este tipo de análisis se escapa de los objetivos previstos para esta publicación, pues requerirían estrategias de *downscaling* compatibles con estudios de tipo local.

LITERATURA CITADA

- Albarrán, A. 2008. Análisis del modelo hipertemporal de la cobertura vegetal de Venezuela en el periodo 1998-2005. Universidad de Los Andes. Escuela de Geografía, Tesis.
- Collinge, S. 1996. Ecological consequences of habitat fragmentation: implications for landscape architecture and planning. *Landscape and Urban Planning* 36:59-77.
- Chuvieco, E. 1998. El factor temporal en teledetección: evolución fenológica y análisis de cambios. *Revista Española de Teledetección* 10:39-48.
- Dyson, F.J. 1977. Can we control the carbon dioxide in the atmosphere? *Energy*, 2:287-291.
- FAO. 2003. *Situación de los bosques del mundo*. Roma. ftp.fao.org.
- FAO. 2011. *Situación de los bosques del mundo*. Roma. www.fao.org.
- Garatuza, J., W.J. Shuttleworth, D. Encines, D.D. McNeil, J.B. Stewart, H. de Bruin, C.J. Watts. 1998. Measurements and Modeling Evaporation for Irrigated Crops in Northwest México. *Hydrological processes* 12(9):1737-1418.
- Harris, L. 1984. The Fragmented Forest: Island Biogeography Theory and the Preservation of Biotic Diversity. Chicago: University of Chicago Press.
- Hernández, L. 2008. Cambio Global y su Relación con la Conservación y el Uso de los Bosques Neotropicales. *Revista Forestal Venezolana* 52(1):101-108.
- Huber, O. y C. Alarcón. 1988. Mapa de Vegetación de Venezuela. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables, The Nature Conservancy, Fundación Bioma: Caracas.
- IPCC. 1996. Climate Change 1995. *Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. Cambridge, New York, 879 pp.
- IPCC. 2007. Cambio Climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los

- Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.
- Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). 1998. Venezuela digital: Mapa de vegetación. Rodríguez, J., Lazo, R., Solorzano, L., y Rojas, F. (Eds). Centro Internacional de Ecología Tropical (CIET). Caracas, Venezuela. <http://ecosig.ivic.ve>.
- Lasanta, T. 2004. Influencia de la Topografía en la Estacionalidad de la Actividad Vegetal: Análisis en el Pirineo Occidental Aragonés a Partir de Imágenes NOAA – AVHRR. A.G.E. N° 38. Pp 175-197.
- Mitchell, T.D. 2004. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids. About to be submitted. <http://www.cru.uea.ac.uk>.
- Molina, G. y A. Albarran. 2012. Análisis multitemporal y de la estructura horizontal de la cobertura de la tierra: Parque Nacional Yacambú, estado Lara, Venezuela. *Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de Geografía* 22(1):25-40.
- Monkhouse, F. 1978. *Diccionario de términos geográficos*. Barcelona: Oikos-Tau, S. A. - Ediciones, 94 pp.
- Mora, F. y L. Iverson. 1997. Dynamic Stratification of the landscape of Mexico: Analysis of Vegetation Patterns Observed with multitemporal remotely sensed images. *Geocarto international* 12(2):73-87.
- Naciones Unidas. 1992. *Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático*. CMNUCC Naciones Unidas. 27 pp.
- Plonczak, M. 1997. Tipos de Bosque y su Presión de Uso en Venezuela. *Quebracho* 6:69-74.
- Rebolledo, R. 2009a. *Análisis de Cambio por Morfología Binaria de Imágenes en la Determinación de la Vulnerabilidad de los Bosques en Venezuela ante el Cambio Climático*. Memorias de las IV Simposio de Ambiente y Desarrollo. UCV, junio 2009. CD-ROM.
- Rebolledo, R. 2009b. *Vulnerabilidad de los Bosques en Venezuela ante el Cambio Climático*. Memorias de las IV Jornadas Nacionales de Geomática. FIIIDT-CPDI, octubre 2009. CD-ROM.
- Serra, J. 1982. *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, New-York.
- Vargas, F., E. Chuvieco, J. Salas y E. Meza. 2002. Empleo de la Teledetección en el Análisis de la Deforestación Tropical: El caso de la reserva forestal de Ticoporo (Venezuela). *Serie Geográfica* 10:55-76.