

**Estimación del índice de agresividad climática bajo escenarios de cambio climático en la cuenca de Ubaté y Suárez**

**Estimate of Climatic Aggressiveness Index under Climate Change Scenarios in the Ubaté – Suárez Basin in the Departments of Cundinamarca and Boyacá- Colombia**

**Estimativa do índice de agressividade climática sob cenários de mudanças climáticas na bacia Ubaté – Suárez do estado de Cundinamarca e Boyacá – Colômbia.**

Para citar este artículo / To reference this article  
/ Para citar este artigo: Cepeda García, M. y Mena Rentería, D. (2016). Estimación del índice de agresividad climática bajo escenarios de cambio climático en la cuenca de Ubaté y Suárez. *Ingenio Magno*, 7(2), 69-86.

**Magnolia Cepeda-García**

Universidad Santo Tomás,  
Facultad Ingeniería Ambiental

[magnolia.cepeda@usantotomas.edu.co](mailto:magnolia.cepeda@usantotomas.edu.co)

**Darwin Mena-Rentería**

Universidad Santo Tomás,  
Facultad Ingeniería Ambiental

[darwinmena@usantotomas.edu.co](mailto:darwinmena@usantotomas.edu.co)

Fecha de Recepción: 01 de Junio de 2016

Fecha de aceptación: 13 de Julio de 2016

## Resumen

El presente trabajo evalúa la agresividad de la precipitación por medio de los índices de Fournier (IF), modificado de Fournier (IMF) y de concentración de precipitaciones (ICP) en la cuenca de Ubaté y Suárez, en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, así como su comportamiento futuro teniendo en cuenta los escenarios de cambio climático establecidos por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), adoptados en Colombia por el Instituto Nacional de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). El análisis se realizó desde dos escalas de tiempo: decenal e interanual, a partir de lo cual se concluyó que los índices de agresividad climática son mayores para el periodo 1971-2010 en comparación con los datos proyectados en los escenarios de cambio climático. Por otra parte, el IF, por lo menos en un 70% de territorio, superó el valor de 200 mm, lo cual indica que se presenta una agresividad muy alta. El IMF, en el 100% de las ocasiones, independientemente de los diferentes escenarios de cambio climático aplicados y los periodos, presentó una agresividad climática muy alta: superó por mucho el límite de 400 m. Por su parte, el ICP presenta valores de moderadamente estacionales a uniformes en los diferentes escenarios y periodos.

**Palabras clave:** agresividad climática, escenarios de cambio climático, índice de concentración de la precipitación, índice de Fournier, índice modificado de Fournier.

## Abstract

This study evaluated the aggressiveness of precipitation using the Fournier Index – IF, Modified Fournier Index – IMF and precipitation concentration index – ICP, in the Ubaté – Suárez Basin in the departments of Cundinamarca and Boyacá, and its future behavior considering climate change scenarios, established by the Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC and adopted in Colombia by the National Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies – IDEAM. The analysis was carried out over two different time scales decennial and inter-annual, in which it was concluded that the climatic aggressiveness indexes are greater for the current period (1971-2010), with respect to the predicted data in climate change scenarios, furthermore in IF at least 70% of the territory exceeded a value of 200mm which indicates a very high level of aggressiveness, whereas for the IMF in 100% of cases, independently of the different climate change scenarios applied and periods, had a very high level of climate aggressiveness exceeding by far the limit of 400m, as for the ICP, it shows moderately seasonal to uniform values in the different scenarios and periods.

## Resumo

O presente trabalho avalia a intensidade de precipitação por meio dos índices de Fournier - IF, Modificado de Fournier - IMF e de concentração de precipitação – ICP, na bacia Ubaté – Suárez dos estados de Cundinamarca e Boyacá, além de seu comportamento futuro, tendo em conta os cenários de mudança climática, estabelecidos pelo Painel Intergovernamental Sobre mudanças Climáticas – IPCC e adotados na Colômbia; e o Instituto Nacional de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais - IDEAM. A análise foi realizada sob duas diferentes escalas de tempo decenal e homóloga, onde concluiu-se que os índices de agressividade climática são maiores para o período atual (1971 a 2010), com relação aos dados projetados em cenários de alterações climáticas, por outro lado, o IF, pelo menos, 70% de território excedeu o valor de 200 mm, o que indica que apresenta uma agressividade muito alta, enquanto que para o IMF em 100% das vezes, independentemente dos diferentes cenários de alterações

climáticas aplicadas e períodos, apresentou uma agressividade climática muito alta, ultrapassando em muito o limite de 400m; por seu lado, o ICP apresenta valores moderadamente sazonais para uniformes em diferentes cenários e períodos.

**Palavras Chave:** agressividade climática, cenários de mudança climática, Índice de Concentração da Precipitação, Índice de Fournier, Índice Modificado de Fournier.

## 1. Introducción

El estudio de las características de la precipitación, vista desde la perspectiva de la edafología, cobra relevancia debido a la relación que existe entre el efecto erosivo de la lluvia y la pérdida del suelo, lo cual provoca un deterioro en su productividad. Además, el estudio de estas características permite la identificación de los riesgos asociados a la remoción en masa.

Debido a esto, en los últimos años se han venido intensificando los proyectos de investigación relacionados con la agresividad climática. Dentro de estos encontramos, por ejemplo, investigaciones de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (Venezuela), la Universidad de Gante (Bélgica) y el Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (Ceniap, Venezuela), que realizaron cuatro artículos que analizan la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela en diferentes regiones: en los llanos (Lobo *et al.*, 2010), en la región noroccidental (Lobo *et al.*, 2011a), en la región sureste (Lobo *et al.*, 2011b) y en la región de los Andes (Lobo *et al.*, 2012).

Trabajos similares ha desarrollado en Chile la Universidad de Talca, donde se relaciona la agresividad climática con el comportamiento de las precipitaciones en las regiones de Maule (Cornejo, 2006), Biobío y la Araucanía (Olivares, 2009) y la región de Atacama y de Magallanes (Mendoza, 2011).

Estos proyectos de investigación involucran la determinación de un índice que describa el efecto erosivo de las precipitaciones, más conocido como índice de

agresividad climática; dentro de estos se encuentran el índice de Fournier (1960), el índice modificado de Fournier (1978) y el índice de concentración de precipitaciones (1980).

Frente a este problema, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR, 2012) indica:

Así mismo, en los últimos años en la región de Cundinamarca, la variabilidad climática interanual ha venido ocasionando un aumento en la precipitación de hasta 60% durante el Fenómeno de La Niña, la ocurrencia de estos fenómenos parece estar relacionada con la mayor ocurrencia de eventos de emergencia y desastres expresados en deslizamientos, inundaciones, incendios forestales, vendavales y granizadas.

Conclusiones similares se pueden rastrear en la investigación *Compilación y análisis de información sobre registros de eventos de emergencia y desastres asociados al clima en la región capital 1980-2010*, del Ideam *et al.* (2012).

Debido al cambio climático—cada vez más evidente—, en la actualidad se han intensificado fenómenos ambientales en el país, específicamente en la cuenca de Ubaté y Suárez. Uno de los impactos y riesgos ambientales más importantes es la erosión, ya que para esta cuenca se encuentran grados de erosión que van desde *moderada* en zonas planas, hasta *muy severa* en algunos sectores de fuerte pendiente en el flanco oriental.

Lo anterior se explica por cuanto las unidades morfológicas se encuentran sometidas a procesos degradacionales y agradacionales como estos: la erosión hídrica (EH), que varía desde laminar hasta surcos y cárcavas; los procesos de remoción en masa o deslizamientos; los procesos aluviales, agrupados en erosión lateral y de zonas de desborde e inundación (CAR, 2012). Las consecuencias de estos procesos son pérdida de suelos aptos para la agricultura, pérdida en la calidad del relieve y pérdida en la capacidad de reserva de agua. Al tiempo, esta degradación se ve favorecida en sitios frágiles, por presión de pastoreo y malas prácticas de manejo.

Estos fenómenos han quedado registrados en diferentes noticias. Ejemplo de ello son los siguientes titulares “Cundinamarca enfrenta la emergencia más grave de los últimos 100 años” (Semana, 2011); “Tres de cada 10 colombianos, en riesgo por inundación y deslizamiento” (El Tiempo, 2015); “Inundaciones y deslizamientos aumentan por la temporada de lluvias” (Vanguardia, 2016).

Por ello, el objetivo del presente trabajo es estimar el índice de agresividad climática bajo escenarios de cambio climático en la cuenca de Ubaté y Suárez, en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá.

## 2. Materiales y métodos

El presente proyecto se enmarca en el diseño documental, que consiste en un proceso basado en la búsqueda, la recuperación, el análisis, la crítica y la interpretación de datos secundarios. En específico, estos datos son de la cuenca de Ubaté y Suárez, ubicada al norte de Cundinamarca y al suroccidente de Boyacá. Como se muestra en la figura 1, esta cuenta con un área de 1969 km<sup>2</sup>, con altitudes entre los 2400 y los 3750 m. s. n. m (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2006).

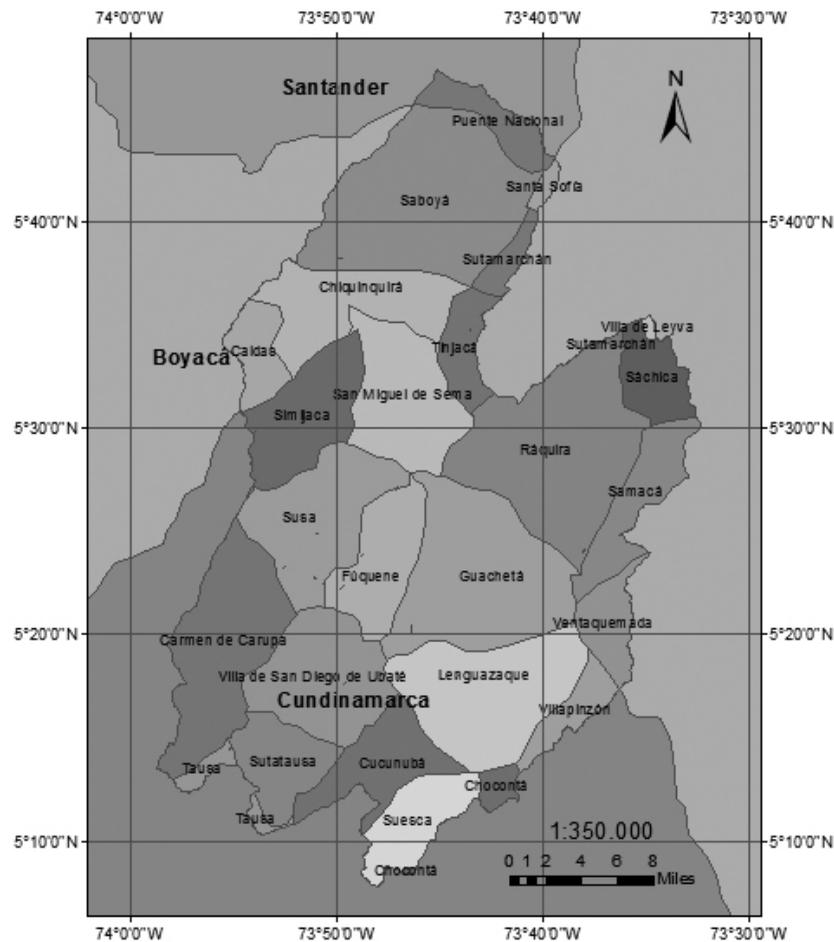
El río Ubaté nace en el municipio de Carmen de Carupa, por la confluencia de los ríos Hato y la Playa; sus principales afluentes son Suta y Lenguaque y alcanza un área de drenaje de 624,91 km<sup>2</sup>. Es también el principal afluente de la laguna de Fúquene, eje de recolección de agua en el valle. Esta laguna tiene un área superficial aproximada de 30 km<sup>2</sup> y drena solamente al río Suárez, que fluye hacia el norte (CAR, 2012).

La cuenca de Ubaté y Suárez corresponde a una de segunda orden, localizada en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, en el altiplano cundiboyacense; cuenta también con 11 cuencas de tercer orden y abarca 25 municipios (CAR, 2012).

La cuenca se encuentra localizada hacia la parte central de la cordillera Oriental y produce un paisaje llano a ligeramente ondulado, en medio de una condición montañosa. Hacia el oriente y el occidente de la cuenca se presentan elevaciones superiores a los 2800 m. s. n. m., lo que significa que existe una condición de clima de paramo.

Por otra parte, se han identificado básicamente cuatro tipos de geoformas, de acuerdo con su posición altitudinal, sus composición litológica y sus estructuras geológicas: montaña, altiplanicie, piedemonte y valle o planicie central (CAR, 2012).

Figura 1. Ubicación de la cuenca de Ubaté y Suárez, con sus municipios



Fuente: elaboración propia a partir de información de la CAR (2012).

Los materiales y la metodología requerida para la aplicación del proyecto se describen a continuación.

## A. Información general

- 1) *Información sobre los escenarios de cambio climático.* Esta se solicitó al Ideam y corresponde a los escenarios propuestos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), adoptados en Colombia por este instituto. Estos pertenecen a caminos representativos de concentración (RCP).

La palabra *representativo* significa que cada RCP proporciona solo uno de los muchos posibles escenarios que pueden conducir a las características del forzamiento radiactivo. El término *camino* hace hincapié en que no solo los niveles de concentración en el largo plazo son de interés, sino también la trayectoria que ha tomado en el tiempo para llegar a ese resultado (Armenta, Dorado, Rodríguez y Ruiz, 2014), para los cuales se tomaron los RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0 y RCP 8,5.

2) *Selección de las estaciones.* Se tomaron para este estudio todas las estaciones que contaran con

información de escenarios de cambio climático y, a su vez, pertenecieran a la cuenca y sus alrededores (tabla 1).

**Tabla 1. Estaciones seleccionadas para la aplicación del índice de agresividad climático**

	Código	Nombre	Departamento	Entidad	M. S. N. M.
Fuera de la cuenca	2120043	Villapinzón	Cundinamarca	CAR	2700
	2120540	Checuca	Cundinamarca	CAR	2580
	2120541	Río Neusa	Cundinamarca	CAR	3100
	2120574	Silos	Cundinamarca	Ideam	2709
	2306512	La Cabrera	Cundinamarca	Ideam	2000
	2312001	La Vereda	Santander	Ideam	305
	2312005	Muzo	Boyacá	Ideam	850
	2312012	Santa Rita	Boyacá	CAR	2800
	2312024	Paimé	Cundinamarca	Ideam	1038
	2401066	Simacota	Santander	Ideam	1050
	2401522	Villa del Carmen	Boyacá	Ideam	2600
	3507002	Venta Quemada	Boyacá	Ideam	2630
	Dentro de la cuenca	2401007	Leticia	Cundinamarca	Ideam
2401014		Cucunubá	Cundinamarca	Ideam	2590
2401015		Simijaca	Cundinamarca	Ideam	2290
2401018		Ráquira	Boyacá	Ideam	2800
2401039		El Triángulo	Cundinamarca	CAR	3130
2401044		Tres Esquinas	Cundinamarca	CAR	2900
2401051		El Zarzal	Boyacá	CAR	2970
2401061		Carmen de Carupa	Cundinamarca	Ideam	2610
2401511		Boyera la Automati	Cundinamarca	Ideam	2580
2401512		Isla del Santuario	Cundinamarca	Ideam	2700
2401521		Sutatausa	Cundinamarca	CAR	2600

Fuente: elaboración propia a partir de información de la CAR (2012).

- 3) *Comportamiento de la precipitación.* Teniendo en cuenta que los índices de agresividad climática dependen de la precipitación, se realizó un análisis sobre su comportamiento tanto en el periodo actual como en los diferentes escenarios de cambio climático, bajo una escala decenal y estacional. Esta última se aplicó a los años seleccionados tanto en el periodo actual como en los escenarios futuros (las condiciones de selección de estos años se encuentran en el literal *D* del presente artículo). Por otra parte, se realizó un análisis de variación porcentual y un análisis del coeficiente de variación.

### B. Índice de agresividad climática

La agresividad climática es un fenómeno que se define como el efecto erosivo de las precipitaciones sobre los suelos. Adicionalmente, está relacionado con la intensidad mensual de la lluvia que muestra un año cualquiera. Para conocer qué tan severos pueden llegar a ser estos efectos, se hace necesaria la utilización de indicadores de agresividad climática, los cuales permiten determinar los impactos de las precipitaciones sobre un área geográfica específica (Olivares, 2009):

- 1) *Índice de Fournier.* Fournier propuso un índice de agresividad climática (IF) como alternativa a los índices planteados por otros autores, donde la obtención y los cálculos son muy complejos. Este índice muestra una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía (Mendoza, 2011). El cálculo se hace en estaciones que tengan datos representativos de la zona por estudiar y la expresión es la siguiente:

$$IF_j = P_{\max j}^2 / P \quad [1]$$

Donde  $IF_j$  es el índice de Fournier para el año  $j$ ;  $P_{\max j}$  es la precipitación correspondiente al mes más lluvioso del año  $j$ , y  $P_m$  es la precipitación media anual.

**Tabla 2. Clasificación del índice de Fournier (IF)**

Clase	IF	Agresividad
1	50 <	Muy Bajo
2	50-100	Bajo
3	100-150	Moderado
4	150-200	Alto
5	200 >	Muy Alto

Fuente: Mendoza (2011).

- 2) *Índice modificado de Fournier.* Arnoldus propuso una modificación del IF: además de considerar la precipitación mensual del mes más húmedo, agrega la precipitación de cada mes; por ello, el índice queda definido de la siguiente manera (Mendoza, 2011):

$$IMF_j = \sum P_{ij}^2 / P_m \quad [2]$$

Donde  $IMF_j$  es el índice modificado de Fournier para el año  $j$ ;  $P_{ij}$  es la precipitación mensual del mes  $i$  (mm) del año  $j$ , y  $P_m$  es la precipitación media anual (mm).

**Tabla 3. Clasificación del índice modificado de Fournier (IMF)**

Clase	IMF	Agresividad
1	100 <	Muy bajo
2	100- 200	Bajo
3	200-300	Moderado
4	300-400	Alto
5	400 >	Muy alto

Fuente: Mendoza (2011).

- 3) *Índice de concentración de las precipitaciones*. Se refiere a cómo se comportan las precipitaciones en su cantidad anual, variación estacional y duración de la estación lluviosa en un año cualquiera (Olivares, 2009):

$$ICP_j = 100\% * (\sum P_{ij}^2 / P_m^2) \quad [3]$$

Donde  $ICP_j$  es el índice de concentración de las precipitaciones para el año  $j$ , expresado como porcentaje;  $P_{ij}$  es la precipitación mensual del mes  $i$  (mm) del año  $j$ , y  $P_m$  es la precipitación media anual (mm).

**Tabla 4. Clasificación del índice de concentración de las precipitaciones (ICP)**

ICP	Clasificación
8,3-10	Uniforme
10-15	Moderadamente Estacional
15-20	Estacional
20-50	Altamente Estacional
50-100	Irregular

Fuente: Olivares (2011)

Luego de aplicar los índices a los datos de precipitación establecidos por los escenarios de cambio climático y a la línea base (periodo actual), se realizó un análisis de los escenarios de cambio climático en dos escalas de tiempo diferentes, con el fin de lograr un acercamiento a lo que podría ser la variabilidad climática proyectada (escala de tiempo interanual) y el cambio climático proyectado (escala de tiempo decenal).

Se determinó la variación espacial por medio del promedio anual de cada una de las estaciones, y los datos se interpretaron por medio del método de

interpolación espacial de distancia inversa ponderada (IDW); esta determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestras (ESRI, s. f.).

Para el caso en el que las estaciones estén distribuidas de manera irregular, el método de IDW se considera como una representación con una variabilidad puntual óptima, lo cual es bueno para variables como la precipitación, a partir de la cual se determinan los índices de agresividad climática (Rodríguez, 2014).

### C. Cambio climático (escala decenal)

El concepto de cambio climático tiene dos grandes definiciones. Por un lado, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), en su artículo 1, lo define como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo compatibles” (Organización de Naciones Unidas, 1992).

Por otro, Armenta *et al.* (2014) lo definen como una importante variación estadística en el estado medio del clima, que persiste durante un periodo prolongado. El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien, a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo.

Para este proyecto se tomó en cuenta esta última definición, que refiere un análisis en un periodo prolongado; por ello, se realizaron promedios de las precipitaciones y se aplicaron los índices para los diferentes escenarios de cambio climático establecidos para cada uno de los periodos futuros (2011-2040; 2040-2070; 2070-2100). Ello nos daría como resultado un periodo aproximado de 30 años a partir de los cuales se obtuvo la variación porcentual de la precipitación,

así como el valor de IMF para cada uno de los periodos con respecto a los diferentes escenarios. A estos últimos también se les aplicaron análisis estadísticos de variación porcentual tanto de los índices como de la precipitación. Con respecto al periodo actual, se agruparon los datos a una escala decenal, es decir, para las décadas de 1970, 1980, 1990 y 2000.

#### **D. Variabilidad climática (escala interanual)**

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante periodos relativamente cortos, en los que se presentan fenómenos de variabilidad climática tales como el Fenómeno de El Niño y La Niña (Montealegre y Pabón, 2000). Para la variabilidad climática actual se tomaron como referencia los años durante los que se presentaron los fenómenos de La Niña y El Niño establecidos por el Ideam (2012), y se realizó el análisis respectivo con las estaciones seleccionadas para el periodo 1971-2010. Luego se seleccionaron dos años dentro de este periodo.

*Criterios de selección de los años en el periodo actual.* Estos representaron la ocurrencia de los fenómenos de El Niño y La Niña que se han considerado de mayor intensidad y duración, y han sido registrados por el Ideam (2012).

Por otra parte, y teniendo en cuenta esta información, se efectuó un análisis de la variabilidad climática futura a partir de las precipitaciones proyectadas en los escenarios de cambio climático. Se estableció la normal climatológica como el promedio de la precipitación para cada uno de los periodos establecidos, y a partir de este dato se identificaron las diferentes anomalías para cada uno de los periodos.

También se tuvo en cuenta que dentro de las fluctuaciones temporales del clima, las que se consideran de mayor transcendencia en la determinación y modulación de procesos atmosféricos relacionados

con la variabilidad climática son la escala estacional, la escala intraestacional y la escala interanual (Montealegre y Pabón, 2000).

El análisis a escala interanual corresponde a las variaciones que se presentan en las variables climatológicas; en este caso, la precipitación de año a año, para cada uno de los periodos futuros establecidos: 2011-2040, 2040-2070 y 2070-2100. A partir de este análisis se seleccionaron dos años: uno que representara un posible año con presencia del Fenómeno de El Niño en el futuro, y otro que representara un comportamiento similar al Fenómeno de La Niña en el futuro.

*Criterios de selección de los años en los escenarios de cambio climático.* A partir de los siguientes criterios se seleccionaron únicamente dos años del periodo 2011-2100, bajo un único escenario de cambio climático. A partir de estos se realizará una comparación con los años seleccionados en el periodo actual:

- 1) Los años seleccionados corresponden a aquellos en los que la precipitación acumulada fue la más elevada y la más baja de la serie histórica y de los diferentes escenarios. Según algunos análisis generales sobre la serie histórica de 1971-2010, existe una relación entre elevados registros de precipitación anual y la incidencia del Fenómeno de La Niña (y, en caso contrario, del Fenómeno de El Niño), lo que se relaciona con la intensidad del fenómeno.
- 2) Se determinó la variación porcentual de la precipitación para cada mes de cada año, en cada uno de los escenarios de cambio climático, y se graficó la cantidad de meses que presentaron una variación porcentual de la precipitación tanto superior como inferior al promedio del periodo por estudiar. De este modo, se seleccionaron los años que durante un periodo más largo presentarían una

variación porcentual tanto positiva como negativa. Según análisis realizados de los años en los que se registraron los fenómenos de La Niña y El Niño (Ideam, 2012), la cantidad de meses en los que se presenta una variabilidad porcentual de la precipitación tanto inferior como superior se relaciona con la duración del fenómeno.

- 3) Estos dos criterios, intensidad y duración, determinan la fuerza del fenómeno; por esto, se tuvieron en cuenta en la selección de los años en los escenarios futuros. Cabe resaltar que estos análisis son de carácter general.

Para los años seleccionados en el periodo actual y en los escenarios de cambio climático se llevó a cabo un análisis a nivel estacional, dentro del cual se determinó la variación temporal a partir de histogramas en los que se relaciona la variación porcentual de la precipitación mensual de los años con respecto al promedio mensual para un año normal en el caso del periodo actual, así como con respecto a la normal climatológica para los escenarios futuros. Finalmente, se realizó un análisis estadístico con el fin de realizar una comparación entre los resultados obtenidos

### 3. Resultados y discusión

La precipitación en la cuenca presentó un comportamiento bimodal tanto para el periodo actual como para los periodos proyectados bajo los diferentes escenarios de cambio climático. La temporada de lluvias se presenta en los meses de abril y octubre, mientras que la temporada de sequía se presenta en los meses de enero y agosto.

#### A. Análisis bajo escala decenal (cambio climático)

*Comportamiento de la precipitación.* Para el análisis de la precipitación bajo los escenarios de cambio climático, a una escala decenal, se presenta una variación porcentual con respecto a la precipitación promedio, que

oscila entre -3,9% y 3,9%, mientras que el análisis de la variación porcentual de la precipitación en el periodo actual a una escala decenal varía entre -4% y 8%.

Debido a estos resultados, se consultaron los modelos de baja resolución del IPCC, donde se estiman cambios de precipitación media (1986-2005 a 2081-2100) entre un -10% y 10%, tanto para el RCP 2,6 como para el RCP 8,5 para Colombia.

Por otra parte, se consultó el documento *Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura en Colombia*, desarrollado por Armenta et al. (2014), donde se hace un análisis de los escenarios sobre las regiones hidroclimáticas de Colombia y se encuentra que en la región del medio Magdalena, a la que pertenece la cuenca, se presentan variaciones porcentuales positivas de la precipitación, en el periodo 2011-2100, hasta de un 8,3%. Esto concuerda con los resultados obtenidos, ya que aunque los valores conseguidos son inferiores a los planteados por el IPCC y por el Ideam, se encuentran dentro de los mismos rangos.

*Aplicación del índice de agresividad climática.* En el periodo actual, el IF se encontró, en el 100% de la cuenca, por encima de 200 mm, es decir, se clasificó como agresividad muy alta; mientras que para los diferentes escenarios de cambio climático se presentaron zonas del territorio en las que incluso se podía clasificar como agresividad moderada.

Esto mismo sucede con el IMF, donde, en promedio, para los escenarios de cambio climático, el índice osciló entre los 700 mm y los 1600 mm, mientras que para el escenario actual estos valores se encontraron en un rango entre los 900 mm y 1900 mm. Aunque en los dos escenarios el IMF se clasifica como agresividad muy alta, al estar por encima de los 400 mm, en el escenario actual los valores son aún mayores.

Finalmente, para el índice de la concentración de la precipitación tenemos que en el escenario actual la totalidad del territorio se clasifica como moderadamente estacional, mientras que en los escenarios de cambio climático una porción del territorio se clasifica como uniforme. Esto nos permite inferir que en cuanto a agresividad climática, dentro de la cuenca de Ubaté y Suárez, el escenario de mayor riesgo corresponde al denominado *escenario actual*, el cual realmente se presentó en el periodo 1971-2010.

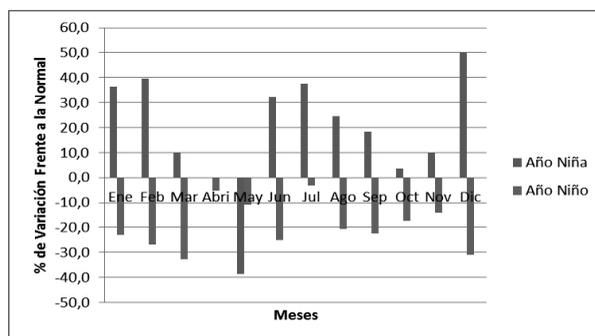
### B. Análisis bajo escala interanual (variabilidad climática)

*Selección de los años para el periodo actual.* Luego de los análisis realizados, se seleccionó 1997 (Fenómeno de El Niño) por ser el año en el que se presentó una

menor precipitación en la mayoría de los meses, así como una mayor duración: 11 de los 12 meses del año. También se seleccionó 2008 (Fenómeno de La Niña), año que registró los valores de precipitación más altos en la mayoría de los meses.

La variación porcentual de la precipitación a escala estacional frente al promedio mensual evidenció un aumento del 50% de la precipitación en el caso más crítico, para los meses en los que se presentó el Fenómeno de La Niña, mientras que para el Fenómeno de El Niño se presenta una disminución de cerca de un 30%, lo que se puede observar por medio de la figura 2. Además, a partir del análisis y la selección de los años se pudo observar un aumento en la intensidad y frecuencia de dichos fenómenos en los últimos años.

Figura 2. Variación porcentual de la precipitación para los años en que se presentaron los fenómenos de El Niño y La Niña



Fuente: elaboración propia a partir de información del Ideam

Con respecto a la precipitación bajo los escenarios de cambio climático a escala interanual, se obtuvieron los datos expresados en las tablas 5 y 6.

**Tabla 5.** Variación porcentual de la precipitación para los años con precipitaciones inferiores a los promedio, para cada uno de los periodos, bajo los diferentes escenarios de cambio climático (escala interanual)

Periodo	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 6,0	RCP 8,5
2011- 2040	-15	-25	-30	-30
2040- 2070	-14	-37	-19	-48
2070- 2100	-29	-30	-32	-23

Fuente: elaboración propia a partir de información del Ideam

**Tabla 6.** Variación porcentual de la precipitación para los años con precipitaciones superiores a los promedio, para cada uno de los periodos, bajo los diferentes escenarios de cambio climático (escala interanual)

Periodo	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 6,0	RCP 8,5
2011-2040	30	18	32	42
2040-2070	25	28	28	18
2070-2100	30	17	33	17

Fuente: elaboración propia a partir de información del Ideam

Como se observa en las tablas 5 y 6, se aprecia que las variaciones porcentuales de las precipitaciones analizadas a una escala inferior aumentan drásticamente y sus valores más críticos llegan hasta un -48% en

las precipitaciones inferiores a la normal y hasta un 42% en las precipitaciones superiores a la normal. Cabe resaltar que los resultados obtenidos son generales debido a la información limitada y la escala de tiempo que se trabajó.

A partir de los resultados de la variabilidad climática futura, se puede apreciar que el comportamiento de la precipitación varía drásticamente de un escenario a otro. Esto resulta apropiado si se tiene en cuenta que cada uno de los escenarios presentan unas condiciones en términos de concentración de dióxido de carbono diferentes.

Ahora bien, aunque se presente una variación de la precipitación en cada uno de los escenarios, este no tiene un comportamiento específico, ya que se esperaría que la precipitación para la cuenca disminuya a mayores concentraciones de dióxido de carbono; es decir, se presente una disminución considerable de la precipitación en el escenario de cambio climático RCP 8,5 con respecto a los demás escenarios, o que en el escenario RCP 2,6 se presenten unas mayores precipitaciones a los demás escenarios. Pero esto no ocurre.

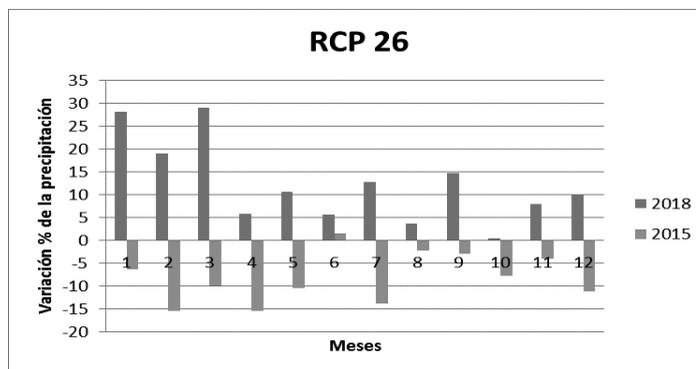
A pesar de lo anterior, y aunque en los resultados no se observa una relación específica entre la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y la disminución de la precipitación, sí se apreció que en los diferentes años predomina la variación porcentual positiva de la precipitación con respecto a la normal.

*Selección de los años para los escenarios de cambio climático.* En relación con la aplicación de los índices de agresividad climática bajo una escala estacional, se seleccionaron para los escenarios futuros los años 2015 (como el año en el que se proyectan precipitaciones inferiores a la normal) y 2018 (como el año con proyección de precipitaciones superiores a la normal).

Estos años tuvieron patrones similares que se han presentado en los fenómenos de El Niño y La Niña. Para el caso del 2015, este proyecta precipitaciones muy por debajo de la normal, mientras que en el 2018 se proyectan precipitaciones superiores a la normal.

Ambos años se seleccionaron bajo el escenario RCP 2,6, debido a que en este se presentaron las condiciones anteriormente descritas. Las variaciones porcentuales de cada uno de estos años se presentan en la figura 3.

Figura 3. Variación porcentual de la precipitación para 2018 y 2015



Fuente: elaboración propia a partir de información del Ideam

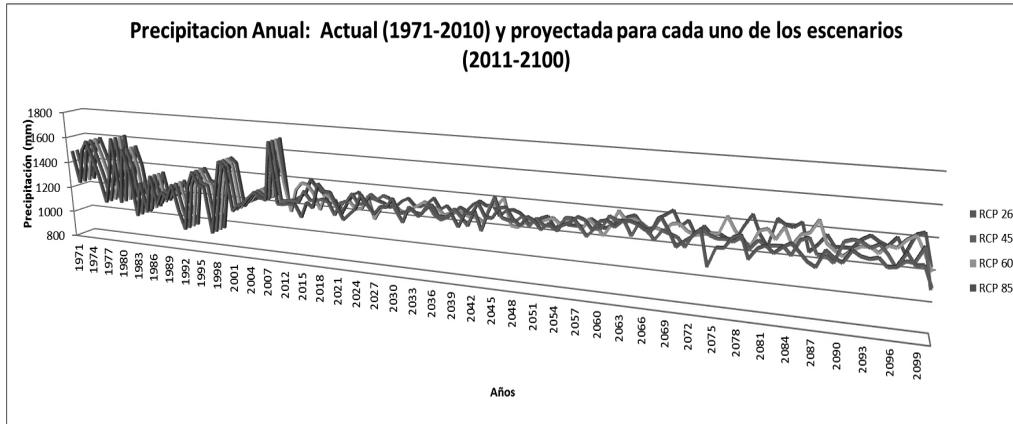
Por medio de esta grafica se puede observar que se presenta una mayor variación positiva en 2018, el cual, según los análisis realizados, se proyecta como un año de mayores precipitaciones bajo el escenario RCP 2,6; mientras que para el mismo escenario en el 2015 se proyectan las menores precipitaciones. Esto concuerda con la variación porcentual de esta, pues se encuentran por debajo de la normal.

de los escenarios pueden llegar a ser mucho más pronunciados, como se observa en los datos actuales. Es importante considerar que no se aprecia fácilmente una relación entre los escenarios (las concentraciones de dióxido de carbono) y la precipitación.

A través de la figura 4 se observa un cambio en el comportamiento promedio anual de la precipitación desde 2011 y hasta 2100 con los diferentes escenarios de cambio climático. Es importante resaltar que los datos proyectados en la figura 4 corresponden a los suministrados por el Ideam y representan la escala estacional. Para motivos del análisis se realizaron promedios anuales.

Además, la figura 4 podría llegar a indicarnos que los picos de precipitación proyectados para cada uno

Figura 4. Precipitación anual: actual (1971-2010) y proyectada para cada uno de los escenarios (2011-2100)



Fuente: elaboración propia a partir de información del Ideam.

*Coefficiente de variación.* Al aplicar este análisis estadístico en los valores de precipitación para el periodo actual y el escenario futuro bajo las escalas decenal e interanual, se obtuvieron los resultados que se presentan en el tabla 7.

Tabla 7. Coeficiente de variación

CV	Escala decenal	Escala interanual
Periodo actual	6,5%	42,0%
Escenario futuro	15,0%	37,0%

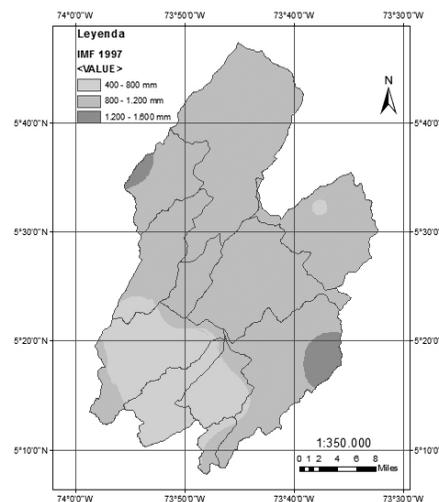
Fuente: elaboración propia.

A partir de la tabla 7 se puede observar que para la escala decenal los valores de precipitación son homogéneos, al encontrarse por debajo del 20%, lo que significa que no hay una variación muy alta. Por su parte, para los datos analizados a escalas de menor tiempo, como la interanual, encontramos una distribución heterogénea, lo que significa que se presenta una mayor variabilidad con respecto a la media. Estos hallazgos concuerdan

con los resultados obtenidos de la variación porcentual de la precipitación.

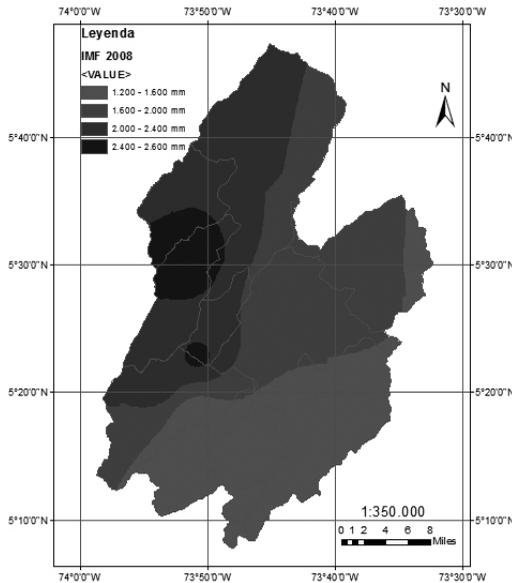
*Aplicación del índice de agresividad climática.* El análisis de la aplicación del IMF para estos años se representa en los siguientes mapas y en la tabla 8.

Figura 5. IMF aplicado al año 1997 (Fenómeno de El Niño)



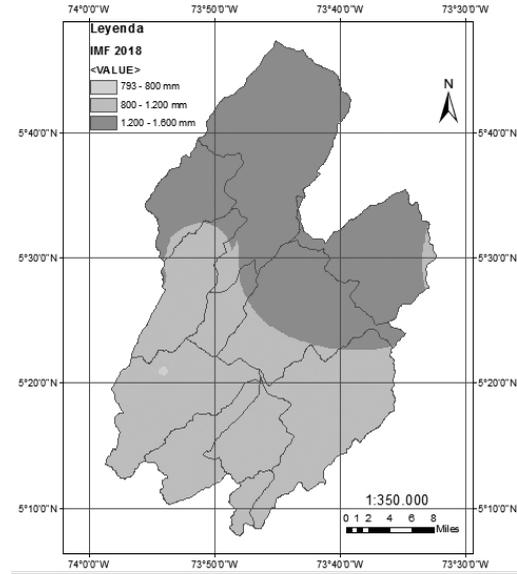
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. IMF aplicado al año 2008 (Fenómeno de La Niña)



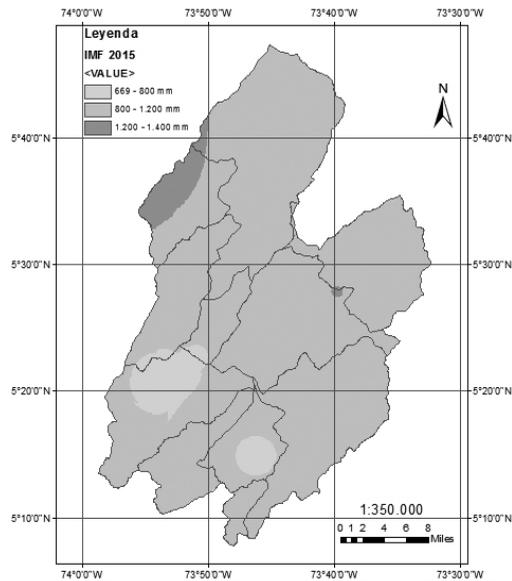
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. IMF aplicado al año 2018 (escenario RCP 2,6)



Fuente: elaboración propia.

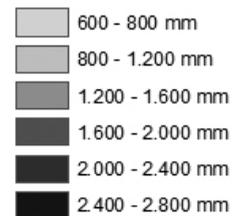
Figura 7. IMF aplicado al año 2015 (escenario RCP 2,6)



Fuente: elaboración propia.

Los mapas anteriores están ajustados a una misma escala de colores, como se indica en la figura 9.

Figura 9. Leyenda IMF



Fuente: elaboración propia.

**Tabla 8. IMF bajo el escenario RCP 2,6 para los años 1997, 2008, 2015 y 2018**

	1997	2008	2015	2018
Mínima	400 mm	1000 mm	600 mm	600 mm
Máxima	1400 mm	2800 mm	1400 mm	1600 mm

Fuente: elaboración propia.

A partir de la tabla 8 se aprecia que la diferencia entre los valores de IMF es mucho más alta para el periodo actual, ya que en 2008 se presentó el Fenómeno de La Niña y, por ende, se presentan valores IMF que duplican los que se presentaron en 1997, correspondiente al Fenómeno de El Niño. Por otra parte, si analizamos los años proyectados, la diferencia entre estos dos es muy poca.

Además se debe mencionar que la variación espacial de la precipitación y sus índices de agresividad climática, tanto en el periodo actual como en los valores proyectados, presentan sus valores más elevados en la zona norte de la cuenca. En específico, los valores más altos se evidenciaron en las subcuenca de los ríos Chiquinquirá, Lenguazaque, Simijaca y Alto Suárez, mientras que los valores mínimos se presentaron en la subcuenca de los ríos alto Ubaté, Suta y Cucunubá.

#### 4. Conclusiones

A partir de los resultados y su análisis correspondiente se puede concluir que la precipitación presenta una variaciones muy pequeñas en los diferentes escenarios de cambio climático, lo cual indica que los resultados son coherentes con los modelos globales de baja resolución elaborados por el IPCC.

Por otra parte, y a pesar de lo anterior, cabe resaltar que el IF, por lo menos en un 70% de territorio, superó el valor de 200 mm, el cual indica que se presenta una agresividad muy alta. Para el IMF, en el 100% de las ocasiones, independientemente de los diferentes escenarios de cambio climático aplicados y periodos de tiempo, presentó una agresividad climática muy alta: superó por mucho el límite de 400 mm.

Asimismo, al aplicar los índices IF e IMF para el periodo 1971-2010, estos arrojaron resultados elevados en términos de la erosividad de la lluvia, ya que presentaron valores superiores a los observados en los diferentes escenarios y periodos proyectados para el periodo 2010-2100. En consecuencia, hacia futuro es cada vez mayor la probabilidad de que se presente pérdida del suelo en la cuenca a causa de la erosividad de la lluvia.

En los análisis realizados se observa que la fluctuación de la precipitación en términos de cambio climático —es decir, considerada bajo una escala de análisis decenal— es muy pequeña, ya que se encuentra en un rango entre los -4% y +4%. A pesar de esto, los índices de agresividad climática excedieron los valores clasificados como agresividad muy alta.

Es importante entender que al realizar un análisis a escala decenal, se está prescindiendo de información importante, como las anomalías que se pueden presentar en este periodo. Por otro lado, al efectuar una medida aritmética, se realizó un análisis a una escala interanual y estacional, a partir de la cual se observó un aumento en la fluctuación de la precipitación, la cual alcanza en sus puntos más críticos un aumento positivo del 42% y uno negativo del 37%, en los diferentes escenarios. Esto a su vez se ve reflejado en el aumento de los índices de agresividad climática, IF e IMF.

Lo anterior nos permite inferir que si se realiza un análisis a escalas inferiores de tiempo, estas nos permitirán

evidenciar de manera más específica el comportamiento de la precipitación y, por consiguiente, el índice de agresividad climática y su efecto sobre la pérdida erosión del suelo.

Conviene mencionar también que la variación espacial de la precipitación y sus índices de agresividad climática, tanto en el periodo actual como en los valores proyectados, presentan sus valores más elevados en la zona norte de la cuenca; en específico, los valores más altos se evidenciaron en las subcuenca de los ríos Chiquinquirá, Lenguazaque, Simijaca y Alto Suárez, mientras que los valores mínimos se presentaron en la subcuenca de los ríos alto Ubaté, Suta y Cucunubá.

Respecto al procesamiento de los índices de agresividad climática bajo una escala interanual, para los diferentes escenarios y periodos de tiempo se observó que la precipitación presentó un comportamiento independiente de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

Asimismo, se aprecia que la precipitación anual para el periodo 1971-2010) fluctúa en un rango entre los 900 y 1680 mm, mientras que la precipitación para los diferentes escenarios fluctúa lo hace entre los 1100 y 1410 mm. Por ello, se puede deducir que los valores proyectados de precipitación no representarían el comportamiento real de las precipitaciones, motivo por el cual los resultados hallados en este proyecto respecto a los índices de agresividad climática y la erosividad de la lluvia, basados en estos escenarios, pueden aumentar o disminuir drásticamente en condiciones reales. Por esta razón, en el periodo actual se identificaron los índices de agresividad climática y erosividad de la lluvia más elevados que en ningún otro escenario futuro.

## 5. Referencias

Armenta Porras, G. E., Dorado Delgado, J., Rodríguez Roa, A. O. y Ruiz Murcia, J. F. (2014). *Escenarios de cambio climático para precipitaciones y temperaturas en Colombia*. Bogotá.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam).

Cornejo, F. (2006). *Análisis del comportamiento espacial y emporal de las precipitaciones en la séptima región del Maule*. Talca, Chile: Universidad de Talca.

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) (2012). *Diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica de los ríos Ubaté-Suárez*. Bogotá: Autor.

Departamento Nacional de Planeación (DNP) (2006). *Estrategia para el manejo ambiental de la cuenca Ubaté - Suárez*. Bogotá: Autor.

El Tiempo (2015, 20 de abril). Tres de cada 10 colombianos, en riesgo por inundación y deslizamiento. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/riesgo-por-inundaciones-y-deslizamientos-en-colombia/15786157>

ESRI. (s. f.). *ArcGIS Resource Center* (ESRI). Recuperado de [help.arcgis.com](http://help.arcgis.com)

IDEAM y PNUD. (2012). *Evolución de precipitación y temperatura durante los fenómenos El Niño y La Niña*. Bogotá: Autor.

IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguvio, Instituto Alexander von Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia, MADS y DNP (2012). *Compilación análisis de información sobre registros de eventos de emergencia y desastres asociados al clima en la Región Capital 1980-2010*. Bogotá: Autor.

- Lobo, A., Cortez, M., Rodríguez, F., Ovalles, F., Rey, J., Gabriels, D. y Parra, R. (2012). Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela, IV. Región Los Andes. *Bioagro*, 24(2), 115-120.
- Lobo, D., Cortez, A., Rodríguez, M., Ovalles, F., Rey, J., Gabriels, D. y Parra, D. (2011a). Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela II. Región Noroccidental. *Bioagro*, 23(1), 13-18.
- Lobo, D., Cortez, A., Rodríguez, M., Ovalles, F., Rey, J., Gabriels, D. y Parra, R. (2010). Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela I. Región los llanos. *Bioagro*, 22(3), 169-176.
- Lobo, D., Cortez, A., Rodríguez, M., Ovalles, F., Rey, J., Gabriels, D. y Parra, R. (2011b). Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela III. Región sureste. *Bioagro*, 23(2), 99-104.
- Mendoza, R. (2011). *Análisis comparativo del comportamiento de las precipitaciones y su agresividad climática en zonas áridas seas y semiáridas frías*. Talca: Universidad de Talca.
- Montealegre Bocanegra, J. y Pabón Caicedo, J. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo del niño - niña - Oscilación del sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 2, 7-21.
- Naciones Unidas. (1992). *Convección Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Olivares, C. (2009). *Determinación del comportamiento de las precipitaciones y de su agresividad climática, en las regiones Bío Bío y de la Araucanía*. Talca: Universidad de Talca.
- Ramírez, C. (2014). *Análisis del comportamiento de las precipitaciones y de su agresividad climática en la cuenca de los Ríos Ubaté y Suárez en el noroccidente del departamento de cundinamarca*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Rodríguez Santos, J. M. (2014). *Aplicación de métodos de interpolación para el cálculo de precipitación por modelamiento geoestadístico y análisis espacial para el departamento de Cundinamarca*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Secretaría de Salud de Boyacá (2014). *Mapa de Riesgo de la calidad del agua para consumo humano del centro urbano del municipio de Chiquinquira - Boyacá*. Tunja: Autor.
- Semana (2011, 20 de abril). Cundinamarca enfrenta la emergencia más grave de los últimos 100 años. Recuperado de <http://www.semana.com/nacion/articulo/cundinamarca-enfrenta-emergencia-mas-grave-ultimos-100-anos/240084-3>.
- Universidad de la República Uruguay. (2014). *Edafología*. Montevideo: Autor.
- Vanguardia (2016, 27 de abril). Inundaciones y deslizamientos aumentan por la temporada de lluvia. Recuperado de <http://www.vanguardia.com/colombia/356278-inundaciones-y-deslizamientos-aumentan-por-la-temporada-de-lluvias>.