

Capítulo I

Comportamiento de parámetros climáticos a partir de datos regionales



1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha aumentado el interés por estimar variaciones en los procesos biogeoquímicos a gran escala, con relación a su variabilidad espacial y temporal, debido a la preocupación del efecto ocasionado por el hombre sobre el ciclo global de los recursos naturales”.

Hay que tener en cuenta que al existir diferentes coberturas en los suelos y distribuciones espaciales, se pueden alterar las condiciones climáticas locales y regionales. Es tal el efecto de las coberturas del suelo, que es un condicionante de la manera como la energía solar incide sobre ellas. Por ejemplo, el remplazo de árboles por pasturas o cultivos, aumenta el albedo, que consiste en el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma, lo cual representa a escala local un aumento de la temperatura y disminución de la humedad, que, a su vez, ocasiona una modificación en la composición de especies que pueden regenerarse en el sitio, y afecta ciclos de disturbios, como el del fuego.

A escala regional se puede evidenciar que el remplazo de bosque o vegetación nativa por pastura tiene efectos similares, pues provoca un aumento regional de la temperatura y una disminución de la precipitación, y puede, igualmente, alterar los patrones de circulación atmosférica, al acentuar o atenuar las diferencias de temperatura, y por ende, presión entre regiones (Nosseto, Jobbágy & Paruelo, 2005). La influencia del tipo de vegetación tiene consecuencias evidentes también en las cuencas hidrográficas, por lo tanto, una planificación de los tipos de vegetación y el uso del suelo en la parte alta de las cuencas, especialmente desde los ecosistemas de páramo, es un factor determinante para los planes de manejo ambiental actuales.

Los ecosistemas y su distribución están determinados por el factor climático, y los sistemas presentes y futuros son reflejo de una interacción entre variables como suelo, clima y uso del suelo. El efecto del cambio climático, aunado a los efectos de la pérdida de hábitat y fragmentación de paisajes, posibilitará que se modifique la composición de la mayoría de los ecosistemas, cambiando los hábitats de muchas

especies. De esta forma se aumentará el régimen de pérdida de algunas especies y se crearán oportunidades para el establecimiento de otras (IPCC, 2002).

El aumento de la temperatura, que se espera para este siglo, reduciría fuertemente la superficie de la zona bioclimática del páramo y sus franjas de subpáramo y superpáramo, con consecuencias que pueden ser más graves en páramos ya fuertemente intervenidos, como es el caso del páramo de La Cortadera; ambos procesos afectarán tanto la biodiversidad como la oferta de agua (Van der Hammen, 2002).

En el presente capítulo se muestra un análisis espaciotemporal de las características climáticas que permiten determinar patrones de comportamiento en el páramo de La Cortadera. Se inicia con una descripción de series temporales de temperatura diurna y nocturna para los años 2005 a 2012; además, se estudian datos espaciotemporales de medidas de precipitación adquiridas por estaciones climatológicas cercanas a la región de estudio. De acuerdo con estos análisis, se definen ciclos estacionales y se determinan fechas en las que existen cambios representativos del uso y cobertura del suelo, que permitan establecer de forma cualitativa y cuantitativa los cambios que se han presentado en las regiones de estudio en esta serie de tiempo.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y PÁRAMOS

Tal vez el efecto más crítico del cambio climático sea el aumento de la temperatura global, pero no es el único. Existen en Colombia estudios que evidencian los efectos directos que se presentarían sobre el ambiente. Como resultado de estos estudios se ha observado un marcado retroceso de los glaciares de montaña, aumento de la temperatura y cambios en la humedad y las lluvias, entre otros, que afectarán a medio y largo plazo la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas, en términos de sus ciclos fenológicos, nutrientes y agua, procesos que finalmente incidirán en la prestación de bienes y servicios que brindan los ecosistemas a los seres vivos (Rodríguez, Pabón, Bernal & Martínez, 2010).

Las últimas estimaciones concluyen que globalmente la temperatura media del aire se ha incrementado en 0,6 +/- 0,2 °C durante los últimos 100 años (IPCC, 2001). Así mismo, a nivel nacional, se estima que con un aumento proyectado para el 2050, de la temperatura media anual del aire entre 1 °C y 2 °C, y una variación en la precipitación \pm 15%, el 78 % de los nevados y el 56% de los páramos, desaparecerán (IDEAM, 2001).

El aumento de la temperatura que se espera para este siglo reduciría fuertemente la superficie de la zona bioclimática del páramo y sus franjas de subpáramo, páramo y superpáramo, con consecuencias que pueden ser más graves en páramos ya fuertemente intervenidos; ambos procesos afectarán tanto la biodiversidad

como la oferta de agua (Van der Hammen, 2002). La reducción del tamaño y de la biodiversidad, disminuirá su capacidad para absorber agua, lo que aumentará la escorrentía, la erosión y la sedimentación aguas abajo (Catarious & Espach, 2009).

Por otra parte, dentro de los factores de la importancia de conservar este ecosistema estratégico, aparte de los múltiples servicios y bienes ambientales que provee, hay otro factor de relevancia, como es la cantidad de carbono que retienen estos ecosistemas, sobre todo en el compartimiento del suelo, que de no ser conservado, sería emitido en forma de CO₂ atmosférico y contribuiría al cambio climático (Serrano, Páez & Ramírez, 2008).

2.2 CAMBIO CLIMÁTICO Y USO DEL SUELO

Se ha estudiado el efecto del cambio de uso del suelo en el cambio climático, tanto a nivel global como nacional. A nivel global se estima que el cambio del uso del suelo contribuye con un 12% al calentamiento global y, a nivel nacional, el cambio de uso del suelo aporta un 66.6% en las emisiones domésticas totales de gases efecto invernadero, GEI (ACCEFYN, 1998).

En las últimas décadas se han incrementado las investigaciones en el tema cobertura vegetal-clima, debido a que el clima es un factor primordial en la distribución de los patrones mundiales de los ecosistemas y, al mismo tiempo, los ecosistemas, a través de su cobertura vegetal y suelos, pueden afectar el sistema climático (Zhao, Pitman & Chase, 2001; Chapin et ál., 2000; Foley, Heil Costa, Delire, Ramankutty & Snyder, 2003).

La relevancia de esta relación es tal, que la conversión histórica del uso del suelo por parte del hombre puede haber causado una disminución de la temperatura entre 1 y 2 °C en latitudes medias y un calentamiento de 1 a 2 °C en áreas tropicales deforestadas.

El uso del suelo determina características de la superficie terrestre, como la humedad de la capa superficial del suelo, la regulación del balance de radiación del sistema superficie-atmósfera, los flujos de masa (vapor de agua o CO₂) y energía (calor) entre este sistema y la rugosidad que controla la energía cinética de la atmósfera, principalmente. La afectación del sistema climático, a través de la cobertura y uso del suelo, se resume en dos grandes categorías: procesos biogeoquímicos, que incluyen las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono y metano (CH₄), y procesos biofísicos tales como la modificación del albedo de la superficie del suelo (Rodríguez et ál., 2010). Como los suelos contienen alrededor de tres veces más reservas de carbono orgánico que la biomasa vegetal y animal sobre la tierra y el doble del carbono contenido en la atmósfera, la materia orgánica del suelo es potencialmente la fuente más peligrosa de CO₂ para el calentamiento global, aparte del proveniente de los combustibles fósiles (Sentis, 1994).

2.3 CAMBIO CLIMÁTICO Y BIODIVERSIDAD

Los cambios ambientales globales relacionados con la alteración del clima, los ciclos biogeoquímicos, el uso del suelo, la introducción de especies, entre otros, han cambiado la diversidad local y mundial del planeta, con importantes consecuencias sobre los sistemas ecológicos y sociales (Chapin et ál., 2000). El cambio de uso del suelo es uno de los principales impulsores del cambio de la diversidad biológica y se proyecta para el año 2100 como el de mayor impacto global, seguido del cambio climático (Sala et ál., 2000; Hansen et ál., 2001; Duraiappah et ál., 2005; Fischlin & Midgley, 2007).

En cuanto a las alteraciones por el efecto del cambio climático en los páramos, se espera que varias especies tengan problemas para encontrar en el antiguo superpáramo su ambiente propio, zonal o azonal. Se puede suponer que especialmente las especies endémicas y frecuentemente de requerimientos ecológicos especiales, de los géneros *Espeletia* y *Espeletiopsis*, correrán peligro de extinción (IDEAM, 2003).

Dentro del contexto de los Andes, el alto valor para la biodiversidad no está en la riqueza de especies sino en su singularidad. Gracias a las adaptaciones a condiciones extremas, en el páramo existen muchas especies que no se encuentran en ninguna otra parte (Hofsted et ál., 2003), factor que convierte al páramo en un ecosistema de suma importancia a la hora de adelantar planes de adaptación y mitigación ante el efecto del cambio climático.

2.4 ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DE DATOS DE SENSORES REMOTOS

La determinación del comportamiento de las variables extraídas mediante el procesamiento de información satelital debe ser comprendida con técnicas de análisis espacial y temporal. El control y posterior seguimiento de la planificación territorial encuentran en los SIG y la teledetección herramientas de análisis espacial particularmente potente. Ambas tecnologías están desempeñando un papel importante en la adquisición, procesamiento y análisis de información espacial o geoinformación del territorio, sobre todo con fines de inventario, planificación y gestión. De esta manera, en primera instancia, el sistema informático debe proporcionar información suficiente para el análisis del entorno y de los recursos (Conesa, Álvarez & Granell, 2004).

Dado que el valor de una observación en una localización concreta puede informar sobre el valor de otra localización de interés cercana a ella, resultará crucial el análisis de la estructura de la dependencia espacial entre las observaciones disponibles y el desarrollo de procedimientos que permitan estimar el valor de la característica objeto de estudio en una localización no observada, aprovechando la estructura de la dependencia espacial que presenta dicha característica (Montero & Larraz, 2008).

El análisis espacial consiste en la determinación de parámetros de áreas extensas mediante el uso de la geoestadística y el procesamiento de imágenes; mientras que los análisis temporales se fundamentan en la obtención de información en periodos de tiempo constantes y la determinación de comportamientos, tendencias y modelos, que permitan conocer históricos o la predicción del comportamiento de variables específicas.

2.5 ANÁLISIS ESPACIAL DE DATOS GEOGRÁFICOS

El análisis espacial consiste en el estudio de entidades usando propiedades topológicas o geométricas. La geoestadística es el análisis e interpretación de datos geográficamente referenciados y se especializa en el análisis e interpretación de cualquier grupo de datos referenciados, pero con un enfoque de características continuas, y es considerada como uno de los tres campos especializados en el análisis de datos espaciales junto con el análisis de patrones de puntos y la estadística de objetos espaciales discretos (Goovaerts, 1997). La geoestadística tiene tres objetivos principales: estimación de modelos, predicción y prueba de hipótesis, en donde la predicción espacial (interpolación espacial) estima locaciones intermedias usando la información de las muestras (Hengl, 2009).

La geoestadística no es un mapeo convencional de variables ambientales, sino la aplicación de técnicas estadísticas cuantitativas para obtener mapas basados en observaciones en campo, que involucra:

1. Diseño de planes de muestreo y flujos de trabajo.
2. Recolección de datos en campo y análisis en laboratorio.
3. Estimación del modelo usando los puntos muestreados (calibración).
4. Implementación del modelo (predicción).
5. Evaluación del modelo.
6. Distribución y producción de los mapas de salida.

2.6 ANÁLISIS DE DATOS GEOGRÁFICOS

Una serie de tiempo es un conjunto de datos numéricos que se obtienen en periodos regulares de tiempo. La unidad de tiempo puede ser: hora, día, semana, mes, trimestre, año o cualquier periodo que se pueda considerar de interés:

$(Z_t : t = 1, 2 \dots n) = Z_1, Z_2, \dots, Z_t$. Una serie temporal es estacionaria en sentido débil, si existen y son estables la media, la varianza y las covarianzas, es decir, si para todo t :

- $\mu_t = \mu$ constante
- $\sigma_t^2 = \sigma$ constante
- $Cov(Z_t, Z_{t+k}) = Cov(Z_t, Z_{t-k}) = \gamma_k$; $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Para un proceso estacionario, la función de autocorrelación (ACF o ρ^k) se calcula de la siguiente forma:

$$\rho^k = \frac{Cov(Z_t, Z_{t+k})}{\sqrt{Var(Z_t)}\sqrt{Var(Z_{t+k})}} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0}, \text{ donde: } Var(Z_t) = Var(Z_{t+k}) = \gamma_0$$

3. METODOLOGÍA

La base de datos se construyó a partir de información relacionada con: temperatura diurna (8 días - 1 km), temperatura nocturna (8 días - 1 km) para la serie 2005-2012, derivada de la interpretación de imágenes satelitales MODIS y datos de precipitación mensual de las estaciones climatológicas operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM (Tabla 1.1, Figura 1.1).

Tabla 1.1 Ubicación de estaciones climatológicas

ESTACIÓN	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD
Pesca	Pesca	5.31°N	73.04°W
Siachoque	Siachoque	5.30°N	73.15°W
El Encanto	Oicatá	5.36°N	73.19°W
Colegio Agropecuario	Chivatá	5.33°N	73.16°W
San Antonio	Tuta	5.41°N	73.14°W
El Garrocho	Toca	5.37°N	73.07°W
Casa Amarilla	Toca	5.32°N	73.09°W
Azulejos	Tuta	5.39°N	73.12°W
La Copa	Toca	5.34°N	73.12°W
San Cristóbal	Toca	5.35°N	73.11°W
Pila la Finca	Soracá	5.31°N	73.18°W
Rondón	Rondón	5.21°N	73.12°W

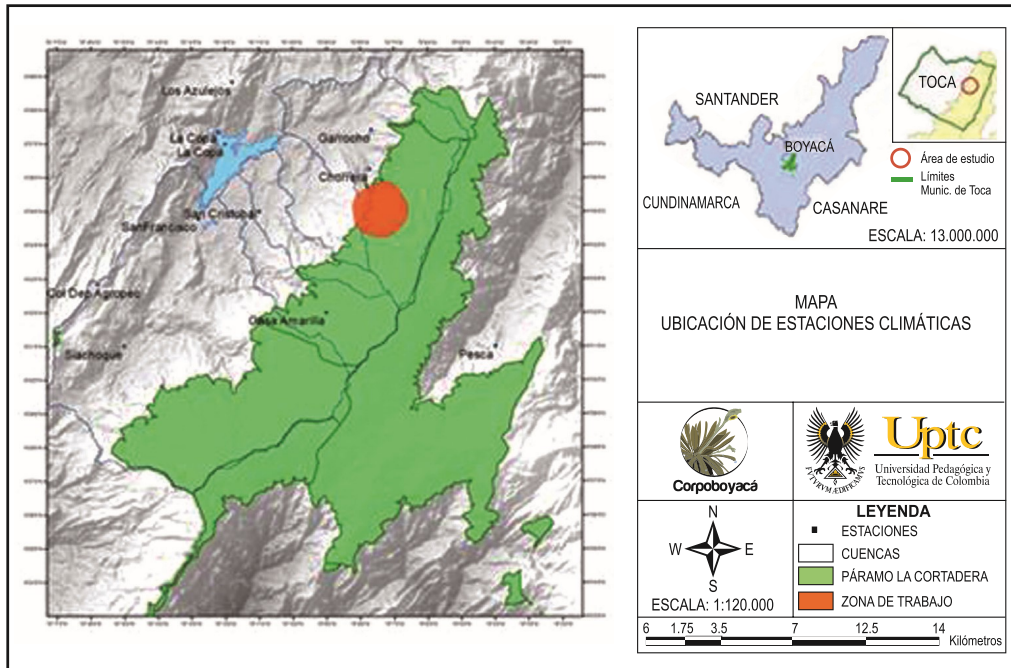


Figura 1.1 Ubicación geográfica de estaciones climatológicas.

3.1 ANÁLISIS ESPACIAL DE LA INFORMACIÓN

3.1.1 Procesamiento de la información de precipitación. Los datos recopilados de precipitación de las estaciones climatológicas del IDEAM ubicadas en los municipios de Pesca, Siachoque, Oicatá, Chivatá, Tuta, Toca, Soracá y Rondón se organizaron en una archivo de texto; después se cargó la información de precipitación según los años de funcionamiento de cada estación en el *software* QGIS, para, de esta manera, realizar los procedimientos de interpolación y generación de isoyetas con el fin de establecer el comportamiento espacial y temporal de la precipitación en la región estudiada. En las figuras 1.2, 1.3 y 1.4 se muestran los valores de precipitación anual para la serie 1991-2011. La escala de colores está representada por niveles rojos para medidas de precipitación bajas, pasando por naranja, amarillo, verde, hasta llegar al azul para valores de precipitación alta. Las estaciones están marcadas por un número (Tabla. 1.2).

Tabla 1.2 Asignación numérica para las estaciones climatológicas

ESTACIÓN	NOMBRE
1	Pescapg
2	Siachoquepm
3	Elencantopm
4	Colagrppm
5	Sanantoniopm
6	Elgarrochopm
7	Casaamaripm
8	Azulejospm
9	Lacopacd
10	San cristobalme
11	Pilalafcaco
12	Rondón

3.2 ANÁLISIS TEMPORAL DE LA INFORMACIÓN

La información espectral se procesó mediante el *software* HEG de la NASA y con un *plugin* desarrollado en Python se realizó la extracción de información para la región de estudio. Se obtuvo la serie temporal 2005-2012 proveniente de datos de productos satelitales (temperatura nocturna (°C) y temperatura diurna (°C)), dividida en tres regiones: **no intervenida** (*vegetación de páramo (Vp)*.), **en recuperación** (*vegetación herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos (Pe)*.) e **intervenida** (*cultivos transitorios (Cu)*). Se realizaron los siguientes procedimientos para identificar el mejor modelo que represente a la serie temporal:

1. Se graficó la serie de tiempo; se examinó y obtuvo una apreciación de la tendencia, estacionalidad, datos aberrantes, varianza no constante y si era o no estacionaria.

2. Para cada serie de tiempo se calculó el coeficiente de variación ($CV = \frac{SD}{Media} \%$); si el CV es mayor que el 30%, la serie requiere una transformación que estabilice la varianza. Se utilizaron las siguientes transformaciones: $Z_i, \sqrt{Z_i}, \ln(t), \frac{1}{\sqrt{Z_i}}, \frac{1}{Z_i}$, y a cada una de ellas se le calculó el CV; a la serie de tiempo que presentó el menor CV se le aplicó la respectiva transformación.

3. Se calcularon y examinaron las funciones ACF y PACF muestral de la serie transformada y se estimaron los valores de p y q (usualmente estos valores son menores o iguales a 3). Así se halló el mejor modelo ARMA (p, q) para la serie de tiempo.
4. Se calcularon los cuatro datos siguientes al último valor de la serie de tiempo, llamados *pronósticos*.
5. Con el modelo identificado en el paso 3 se obtuvo la ecuación que representa la serie y se modeló la misma; luego se graficó la serie original con la serie modelada en un mismo plano cartesiano para hacer inferencias sobre lo acertado del modelo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS ESPACIAL

En la Figura 1.2 se puede apreciar el comportamiento de precipitaciones para el año 2011; las isoyetas están ubicadas a intervalos de 100 mm. A pesar de presentarse una variación de colores que van desde el azul (mayor precipitación), hasta el rojo (menor precipitación), estas escalas no son representativas; se establecen con el fin de resaltar cambios en la precipitación.

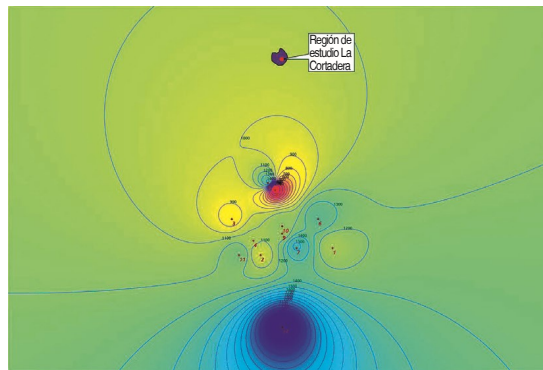


Figura 1.2 Precipitación e isoyetas para el año 2011.

En la figura anterior se pueden observar precipitaciones con un máximo de 2.000 mm para zonas cercanas a la estación Rondón y mínimas de 200 mm para zonas próximas a la estación El Encanto.

En la Figura 1.3 se muestra el comportamiento de precipitaciones para los años 1991-1998; las isoyetas están ubicadas a intervalos de 100 mm. Igualmente, los valores máximos se encuentran en zonas vecinas a la estación Rondón y mínimos cerca de la estación El Encanto.

Para las Figuras 1.4 y 1.5, correspondientes a la serie 1999-2011, se siguen presentando elevadas precipitaciones en zonas cercanas a la estación Rondón, y mínimos en zonas próximas a las estaciones Colegio Agropecuario y Azulejos. Cabe resaltar que durante los periodos 2010 y 2011 se presentan valores de precipitación más elevados, debido a eventos relacionados con la ocurrencia del fenómeno de La Niña.

Es importante destacar que el área correspondiente al páramo de La Cortadera, se caracteriza por presentar regímenes de precipitación bajos, con vegetación típica de estas condiciones, que llevan a definirlo como un páramo seco. En Colombia, las precipitaciones anuales en páramos oscilan entre valores bajos de 600 mm·año⁻¹ hasta más de 3000 mm·año⁻¹. Según Rangel (2000), la clasificación de los páramos colombianos de acuerdo con la precipitación anual va desde páramos secos (< 1200 mm) hasta pluviales (4,050 mm) (Díaz, Navarrete & Suárez, 2005).

En los páramos colombianos, la humedad se manifiesta por el rocío, la constante neblina y las lloviznas frecuentes: características de las altas montañas tropicales de clima húmedo. Esta gran humedad no está directamente relacionada con una precipitación alta, ya que a pesar de que existen regiones donde la precipitación anual es superior a 3000 mm, muchos páramos tienen una precipitación media anual aproximada de 1000 mm o menos. Sin embargo, por las bajas temperaturas y la alta nubosidad, la evapotranspiración es reducida y es esta una de las principales razones del alto rendimiento hídrico de estos ecosistemas (Díaz et ál., 2005).

En escenarios de cambio climático y de acuerdo con las estimaciones nacionales, en aquellas zonas donde la precipitación va a disminuir bajo un escenario menos pesimista, la reducción respecto a los valores de referencia será de hasta 15%, mientras que en la región andina para los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Huila y el oriente del Valle exhibirá una transición climática de clima semihúmedo a clima semiárido (IDEAM, 2010b). Esto está acorde con la tendencia histórica de la precipitación total para el período 1971-2000, en el cual se señala su disminución, principalmente para los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, en donde se encuentra cerca del 32% del área de los páramos del país (Gil, 2012).

Para las estaciones localizadas en el país entre los 3.000 y 4.200 msnm, correspondientes a las áreas donde se encuentran los páramos, se ha establecido una tendencia, aunque variable, hacia la disminución de las precipitaciones anuales del orden de 5,5 mm·año⁻¹; así como una tendencia a la disminución de los eventos extremos, contrario con lo reportado en otros pisos térmicos inferiores a la altitud en mención, donde se espera una intensificación de los eventos extremos (IDEAM, 2010a).

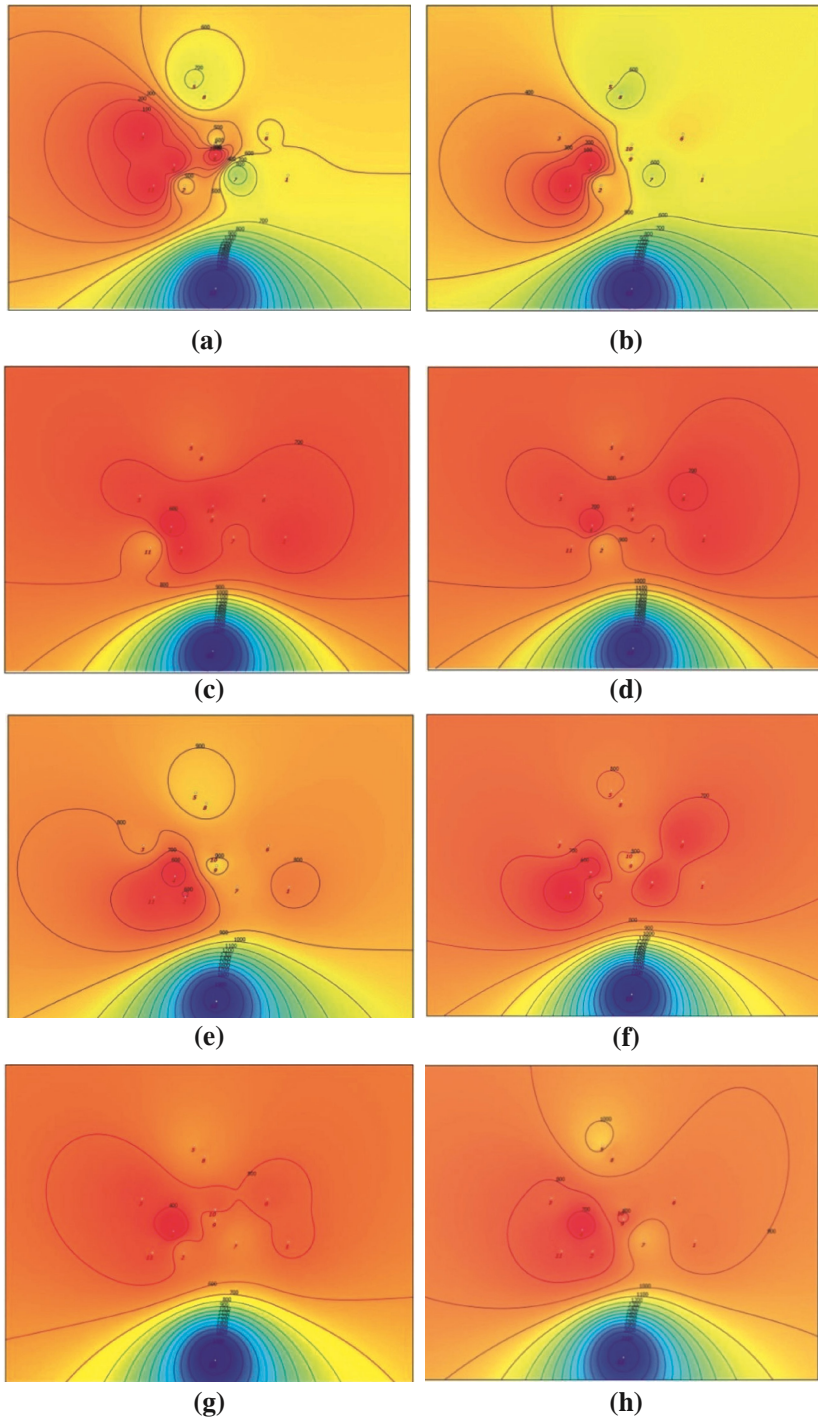


Figura 1.3. Precipitación e isoyetas para los años a) 1991, b) 1992, c) 1993, d) 1994, e) 1995, f) 1996, g) 1997, h) 1998.

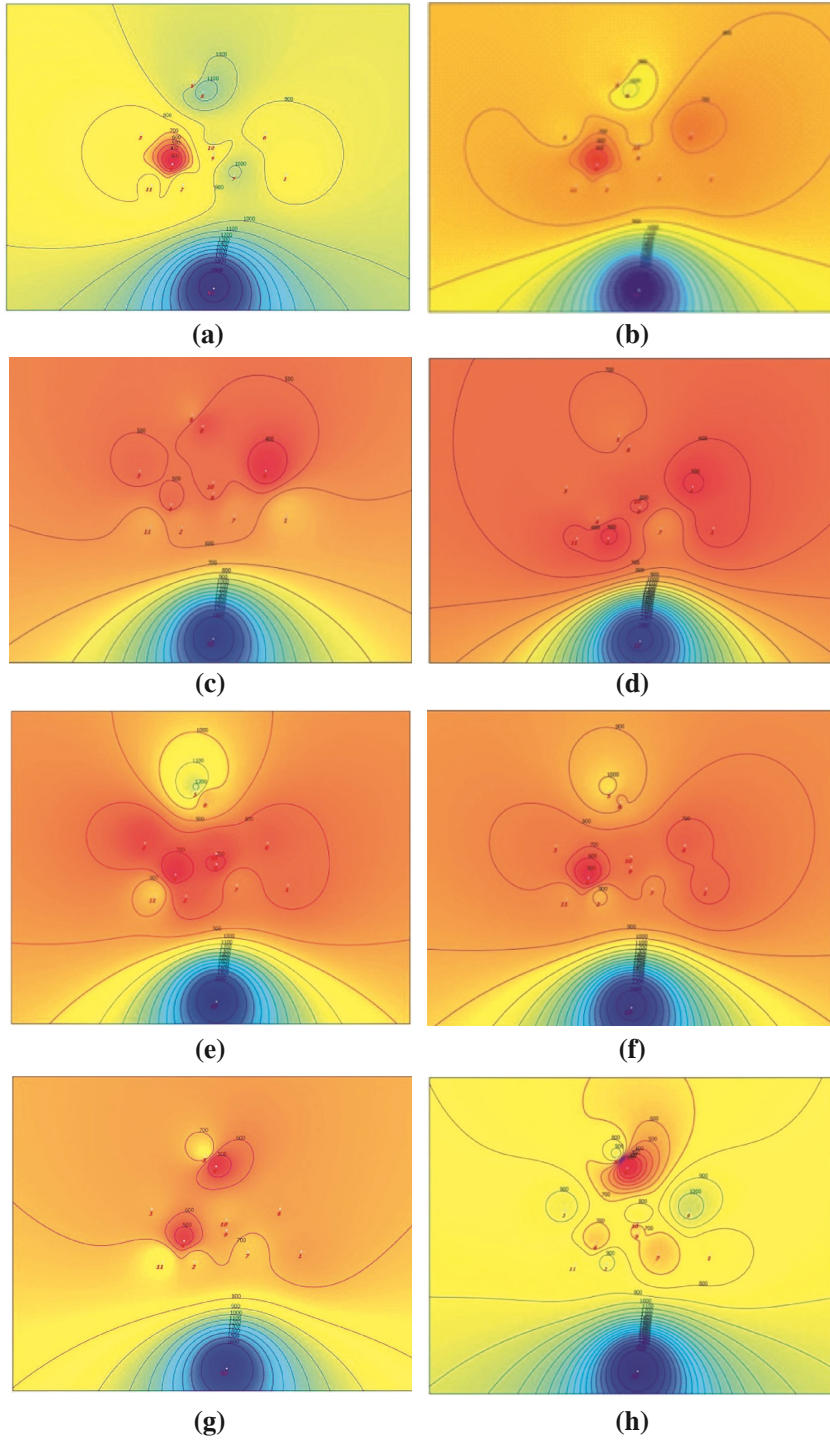


Figura 1.4 Precipitación e isoyetas para los años a) 1999, b) 2000, c) 2001, d) 2002, e) 2003, f) 2004, g) 2005, h) 2006.

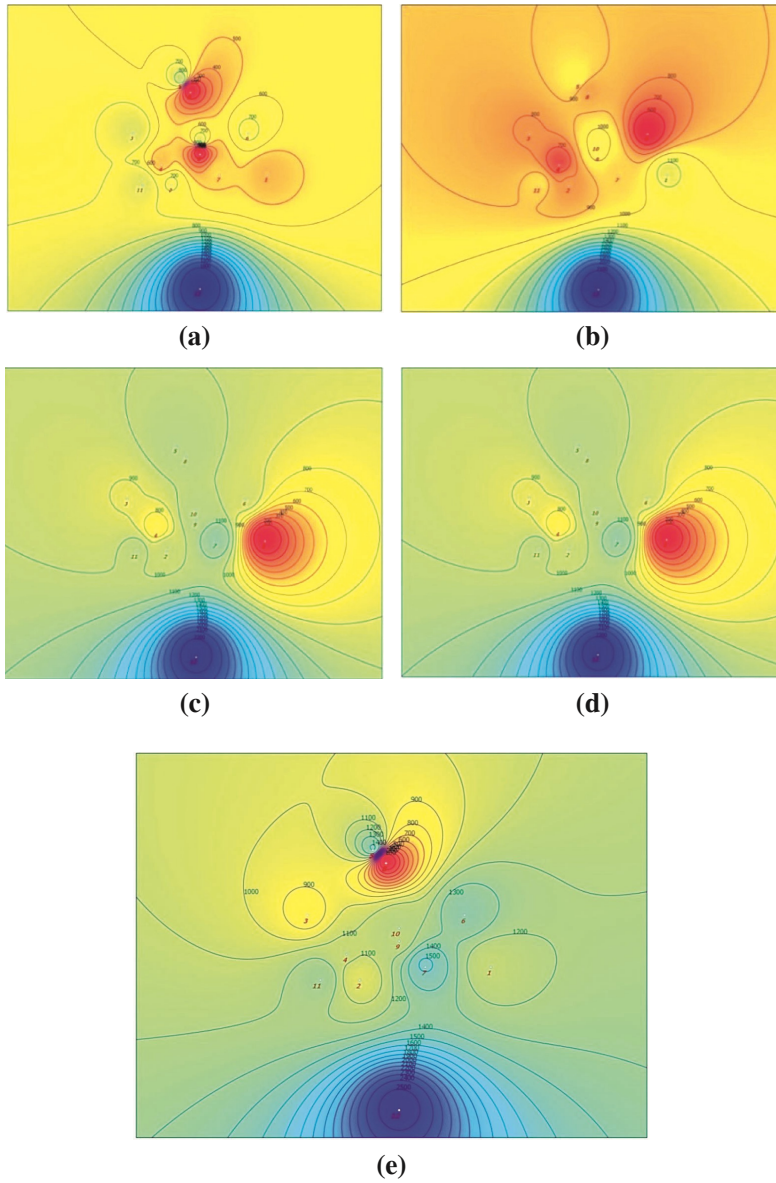
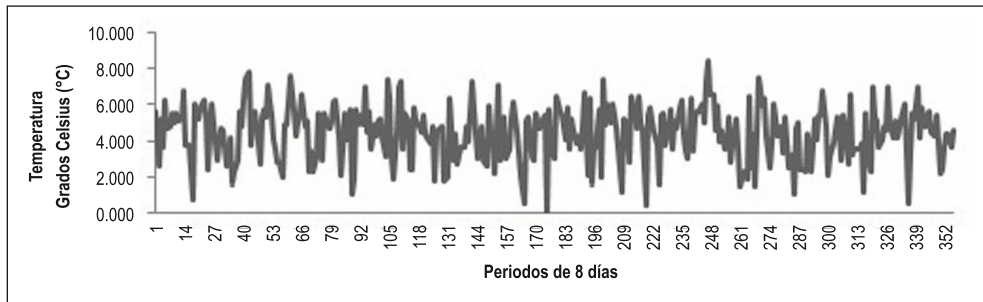


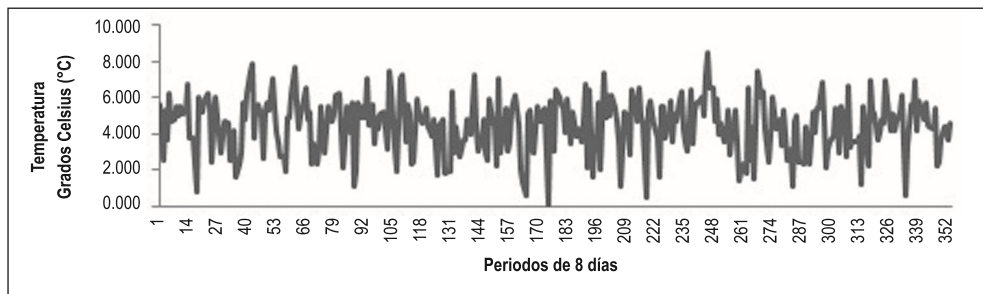
Figura1.5 Precipitación e isoyetas para los años a) 2007, b) 2008, c) 2009, d) 2010, e) 2011.

4.2 ANÁLISIS TEMPORAL

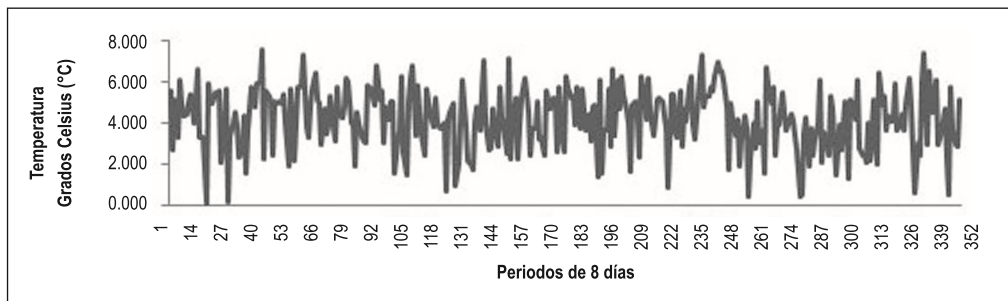
4.2.1 Series temporales. Temperatura nocturna



Intervenido



No intervenido



En recuperación

Figura 1.6 Series temporales de temperatura nocturna.

En la Figura 1.6 se muestra el comportamiento de temperatura nocturna para las distintas condiciones de uso de suelo en estudio (intervenido, no intervenido y en recuperación). Los periodos corresponden a ocho días, dentro de cada intervalo.

De acuerdo con la información de estaciones climatológicas y con base en el tipo de cobertura, para la Figura 1.6 se pueden obtener los siguientes promedios de temperatura nocturna: área intervenida 4.4 °C, área no intervenida 4.2 °C, y área en recuperación 4.2 °C. Al considerar estos datos es evidente un aumento en la temperatura resultado de un desequilibrio en el ecosistema por efecto principalmente del cambio de cobertura.

Las series temporales para temperatura diurna y nocturna se trabajan suponiendo que durante estos años siempre existió la misma cobertura, por esta razón no se pueden tener en cuenta como datos exactos. Los picos presentes representan un cambio significativo en determinado período, sin embargo no se cuenta con datos temporales suficientes para conocer el evento biótico que pudo llegar a alterar dichas temperaturas.

En la Tabla 1.3 se aprecian los parámetros de los modelos correspondientes a cada serie temporal. Dichos modelos consisten en una ecuación matemática que explica el comportamiento de datos climáticos en el tiempo. Se puede considerar una herramienta útil a la hora de realizar pronósticos de hasta cuatro datos después de la última serie, en este caso ocho días; es decir, que con base en estas predicciones se pueden obtener datos posteriores de hasta un mes.

Posterior a esta modelación se calcularon los valores de las series temporales para cada caso, y se obtuvieron las gráficas de comparación entre datos iniciales y modelados (Figura 1.7).

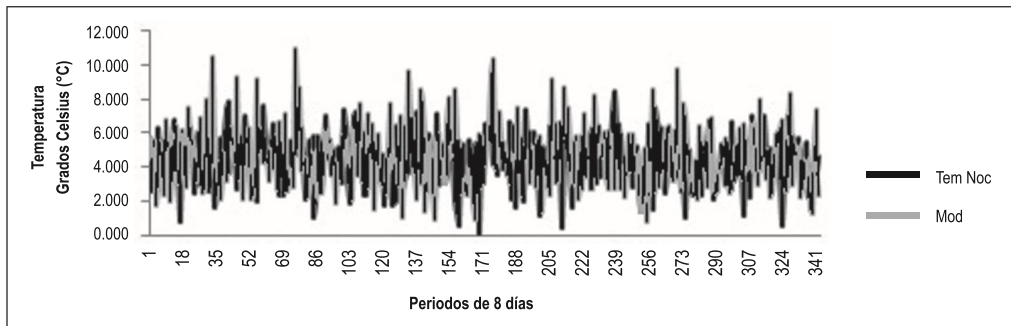
Tabla 1.3 Modelos y parámetros de series temporales de temperatura nocturna.

COBERTURA	OBSERVACIONES	MODELO	PRONÓSTICOS	
Intervenido	Se escoge el modelo ARMA(1,1) como el mejor, con parámetros AR(1)=0.292, MA(1)=0.147 y desviación estándar del ruido blanco SD(at)=0.398	$z_t = 0.292 \cdot z_{t-1} - 0.147 \cdot a_{t-1} + a_t$	357 358 359 360	4.3047 4.2827 4.2761 4.2744
No intervenido	Modelo AR(1) como el mejor, con parámetros AR(1)=0.120, y desviación estándar del ruido blanco SD(at)=1.467	$z_t = 0.120 \cdot z_{t-1} + a$	357 358 359 360	4.3291 4.2549 4.2460 4.2449
En recuperación	Modelo ARMA(1,1) como el mejor, con parámetros AR(1)=0.701, MA(1)=0.597 y desviación estándar del ruido blanco SD(at)=0.409	$z_t = 0.701 \cdot z_{t-1} - 0.597 \cdot a_{t-1} + a_t$	357 358 359 360	3.9730 3.9914 4.0038 4.0126

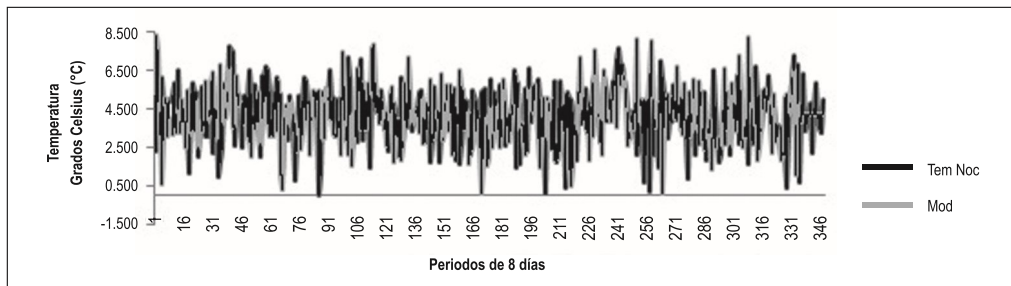
Comparando los modelos obtenidos de las series temporales de temperatura nocturna, se puede observar que los modelos para áreas intervenidas y en recuperación son ARMA (1,1); esto significa que para cada uno de ellos la temperatura en el tiempo t está relacionada linealmente con ella misma en el tiempo $t-1$ y linealmente con la componente aleatoria a_{t-1} . El modelo para áreas no intervenido (zona de páramo) es AR (1), semejante a los modelos anteriores, con la diferencia de que en este modelo no hay relación lineal con la componente aleatoria, lo cual evidencia una uniformidad en la respuesta en cuanto a la no existencia de dependencia de cambios aleatorios anteriores.

Cabe resaltar que existen valores anómalos en las series temporales de los datos originales, los cuales son causados por la presencia de nubosidad en los píxeles de la imagen procesada, correspondientes a las regiones de estudio, por errores en la adquisición de información del sensor o por cambios bruscos en la superficie o cobertura de estudio. Estos datos anómalos son corregidos por el modelo encontrado,

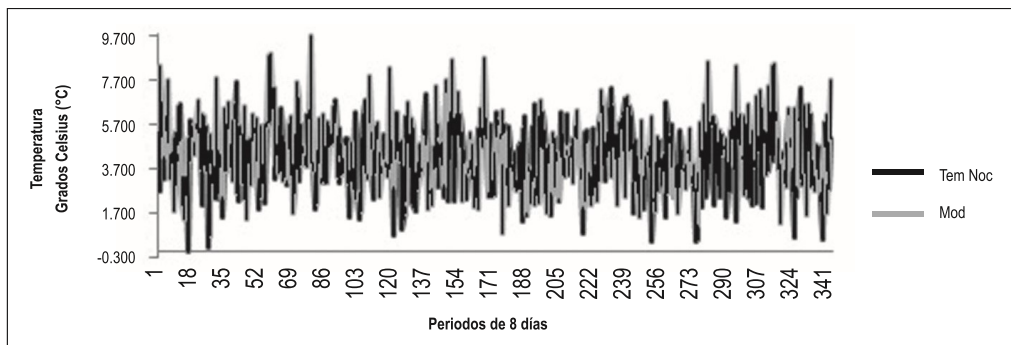
de forma tal que se suavizan las curvas de la serie de tiempo y con las ecuaciones encontradas se obtienen los pronósticos.



Intervenido



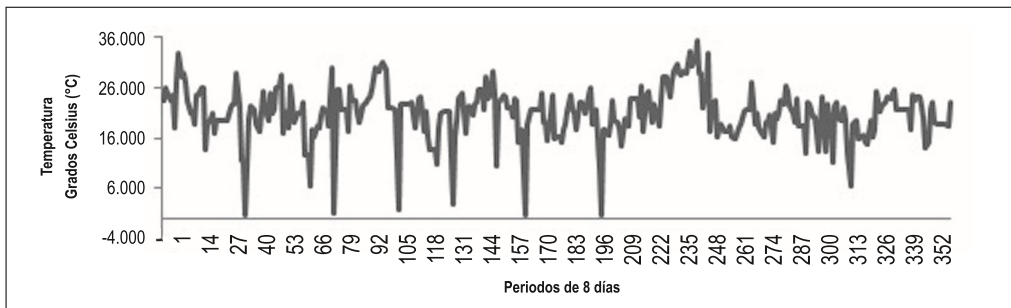
No intervenido



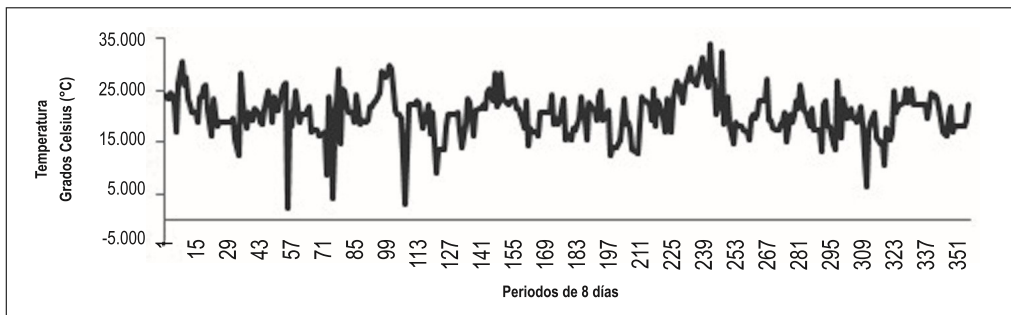
En recuperación

Figura 1.7 Modelos de series temporales de temperatura nocturna.

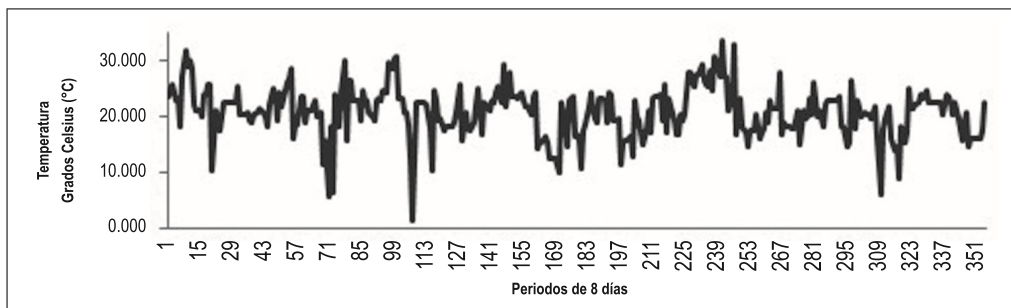
4.2.2 Series temporales. Temperatura diurna



Intervenido



No intervenido



En recuperación

Figura 1.8 Series temporales de temperatura diurna.

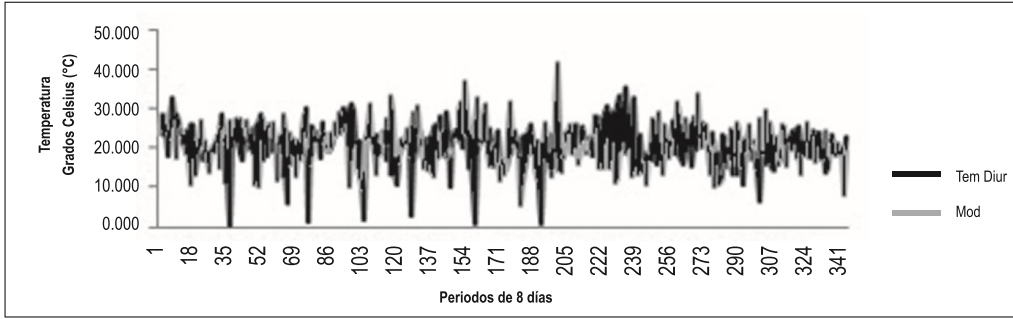
En la Figura 1.8 se presentan los siguientes promedios de temperatura diurna para cada condición de uso de suelo: intervenido 20.9 °C (CV 63,2), no intervenido 20.4 °C (CV 57,8), y en recuperación 20.8 °C (59,3). Al considerar estos datos se puede observar un aumento en la temperatura para el área intervenida, lo que indica que el cambio de cobertura contribuye significativamente al aumento de la temperatura local.

En la Tabla 1.4 se aprecian los parámetros de los modelos correspondientes a cada serie temporal. Se calculan los valores de las series temporales para cada caso, obteniéndose las gráficas de comparación entre datos iniciales y modelados (Figura 1.9).

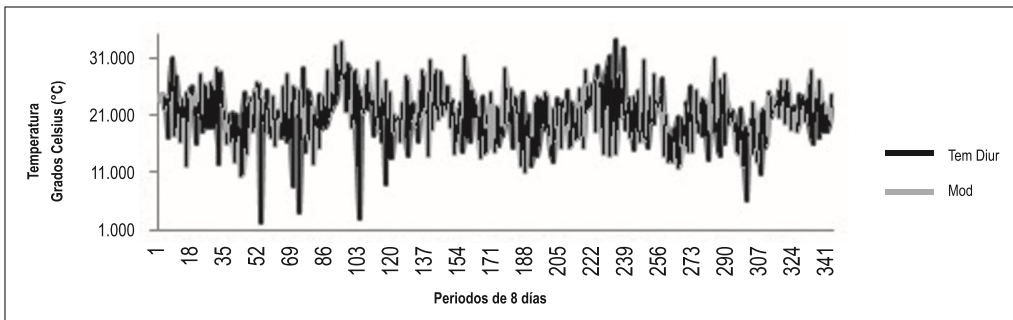
Tabla 1.4 Modelos y parámetros de las series temporales de temperatura diurna.

COBERTURA	OBSERVACIONES	MODELO	PRONÓSTICOS
Intervenido	Se escoge el modelo AR(1) como el mejor modelo, con parámetro $AR(1) = 0.497$ y desviación estándar del ruido blanco $SD(at) = 4.449$	$z_t = 0.497 \cdot z_{t-1} + a_t$	356 21.9129 357 21.4179 358 21.1721 359 21.0501
No intervenido	Modelo AR(3) como el mejor modelo, con parámetro $AR(1) = 0.383$, $AR(2) = 0.053$, $AR(3) = 0.195$ y desviación estándar del ruido blanco $SD(at) = 3.694$	$z_t = 0.383 \cdot z_{t-1} + 0.053 \cdot z_{t-2} + 0.195 \cdot z_{t-3} + a_t$	357 20.681 358 20.404 359 20.832 360 20.641
En recuperación	Modelo AR(2) como el mejor modelo, con parámetro $AR(1) = 0.409$, $AR(2) = 0.218$ y desviación estándar del ruido blanco $SD(at) = 3.713$	$z_t = 0.409 \cdot z_{t-1} + 0.218 \cdot z_{t-2} + a_t$	356 20.8350 357 21.2184 358 20.9792 359 20.9651

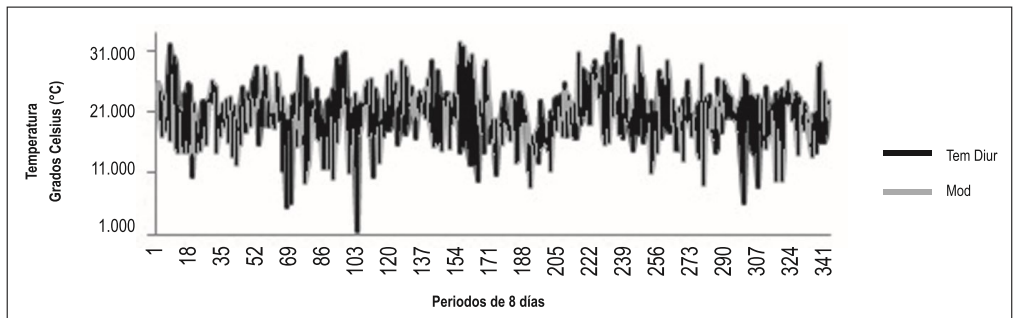
Comparando los modelos obtenidos de las series temporales de temperatura diurna se puede observar que el modelo para el área intervenida es AR (1). Esto significa que la temperatura en el tiempo t , está relacionada linealmente con ella misma en el tiempo $t-1$. El modelo para el área no intervenida es AR (3); esto significa que la temperatura en el tiempo t está relacionada linealmente con ella misma en el tiempo $t-1$, en el tiempo $t-2$ y en el tiempo $t-3$. El modelo para el área en recuperación es AR (2), lo que significa que la temperatura en el tiempo t está relacionada linealmente con ella misma en el tiempo $t-1$ y en el tiempo $t-2$, lo cual permite predecir de mejor manera temperaturas diurnas posteriores con los datos recopilados anteriormente.



Intervenido



No intervenido



En recuperación

Figura 1.9 Modelos de series temporales de temperatura diurna.

5. CONCLUSIONES

Los datos obtenidos de las estaciones climatológicas correspondientes a precipitación, indican que en la mayoría de años estudiados de 1991 a 2011, las precipitaciones más altas se encuentran en zonas cercanas a la estación Rondón, mientras que las que presentan valores más bajos se encuentran en zonas vecinas a estaciones correspondientes a El Encanto, El Garrocho, El Azulejo y La Copa.

En los análisis realizados para establecer el comportamiento de la temperatura diurna y nocturna es importante resaltar que a pesar de que existen modelos útiles, en el momento de predecir tendencias, no es fácil llegar a dar un pronóstico específico y acertado, debido a que no hay estacionalidad marcada en las series de tiempo estudiadas.

De acuerdo con resultados obtenidos en diferentes series de tiempo para áreas no intervenidas, intervenidas y en recuperación, es evidente el aumento de la temperatura diurna y nocturna durante los años estudiados y su relación con la alteración del ecosistema de páramo, debido al cambio en el uso del suelo y el tipo de cobertura.

Los modelos obtenidos en el análisis de series temporales establecen ciertas variaciones en los tipos de cobertura y el tipo de dato espectral estudiado; sin embargo, pueden ser instrumentos útiles para predecir comportamientos futuros de variables climáticas para el estudio de diferentes ecosistemas. Se evidencia la necesidad de continuar con investigaciones relacionadas con los temas de análisis espaciotemporal de variables de campo y espectrales para mejorar las metodologías y optimizar los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales ACCEFYN (1998). *Inventario preliminar de gases de efecto invernadero. Fuentes y sumideros: Colombia 1990. Resumen ejecutivo*. Sociedad Alemana de Cooperación Técnica, GTZ. 10 p. Recuperado de: [http://www.accefyn.org.co/Web_GEI\(actualizada\)/Archivos_gei/I_Resumen.pdf](http://www.accefyn.org.co/Web_GEI(actualizada)/Archivos_gei/I_Resumen.pdf)
- Catarious, M. & Espach, R. (2009, oct.). *Impactos de cambio climático en la seguridad nacional y regional de Colombia*. 50 p. Recuperado de [http://www.cna.org/sites/default/files/CNA%20Impacts%20of%20Climate%20Change%20in%20Colombia%20Spanish%20FINAL%20\(2\).pdf](http://www.cna.org/sites/default/files/CNA%20Impacts%20of%20Climate%20Change%20in%20Colombia%20Spanish%20FINAL%20(2).pdf).

- Chapin, F.S., Zaveleta, E.S., Eviner, V-T., Naylor, R.L., Vitousek, S P., Lavorel, M., Reynolds, H.L., Hooper, D.U., Sala, O.E., Hobbie, S.E., Mack, M.C. & Diaz, S. (2000). Consequences of changing biotic diversity. *Nature*, 405, 234-242.
- Conesa, C., Álvarez, Y. & Granell, C. (2004). *El empleo de los SIG y la teledetección en planificación territorial*. Murcia, España: Universidad de Murcia.
- Corpoboyacá & Fundación Ecosistema Colombia. (2008). *Evaluación del estado de conservación de cuatro especies de frailejones amenazadas (Espeletia paipana, Espeletia chocontana, Espeletia oswaldiana, Espeletia brachyaxianthasubsp. pescana)*. Boyacá, Colombia: Corpoboyacá.
- Díaz, M., Navarrete, J. & Suárez, T. (2005). Páramos hidrosistemas sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64-75. Recuperado de <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/A8%2022.pdf>.
- Duraiappah, A., Naeem, S., Agardi, T., Ash, N., Cooper, D., Díaz, S. et ál. (eds.). (2005). *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis*. Washington, DC: Island Press. 100 p.
- Fischlin, A. & Midgley, G.F. (2007). Ecosystems, their properties, goods, and services. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson, (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 211-272). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Foley, J.A., Heil Costa, M., Delire, C., Ramankutty, N. & Snyder, P. (2003). Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Front Ecol Environ*, 1(1), 38–44.
- Gil, G. (2012). Páramos: potencia vulnerable en las alturas. *Cambium, Boletín Informativo del Centro de Investigación en Ecosistemas y Cambio Climático. Carbono y Bosques C&B*, 9(1), 6–12.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation (Applied Geostatistics)*. New York: Oxford University Press. 496 p.
- Hansen, A.J., Neilson, R.P., Dale, V.H., Flather, C.H., Iverson, L.R., Currie, D.J., Shafer, S., Cook, R. & Bartlein, P.J. (2001). Global change in forests: responses of species, communities, and biomes. *Bioscience* 51 (9), 765–779.
- Hengl, T. (2009). *A practical guide to geostatistical mapping*. 291 p. Retrieved from: <http://spatial-analyst.net/book/>
- Hofstede, R., Segarra, P. & Mena, P. (eds). 2003. *Los páramos del mundo. Atlas mundial de los páramos*. Quito: Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia,. 85 p. Recuperado de http://www.condesan.org/apcafiles/c6924e7390318016d869182e0da9470c/Introduccion_Paramos_mundo.pdf.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2001). *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 307 p. Recuperado de <http://unfccc.int/resource/docs/natc/colnc1.pdf>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2003). *Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en condición hot spot & global climatic tensor*. Recuperado de <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/000689/Introduccion.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2010a). Capítulo 4. Vulnerabilidad. En *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Bogotá: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2010b). Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100). Bogotá: IDEAM.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2001). *ClimateChange2001: The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University. 94 p. Retrieved from <http://www.acrim.com/Reference%20Files/CLIMATECHANGE%202001%20-%20The%20Scientific%20Basis.pdf>
- IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2002). Documento técnico V del IPCC. 93 p. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2013). Resumen para responsables de políticas. En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (eds.). *Cambio climático 2013: bases físicas*. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América: Cambridge University Press. Recuperado de file:///D:/Downloads/WG1AR5_SPM_brochure_es%20BASES%20FISICAS.pdf.
- Molano, J. (1995). Paisajes de la alta montaña ecuatorial. En ECOAN. *El Páramo. Ecosistema de alta montaña*. Serie Montañas Tropoandinas I (pp. 15-62). Bogotá, D.C.: Códice.

- Montero, J. & Larraz, B. (2008). *Introducción a la geoestadística lineal*. La Coruña, España: Netbiblo.
- Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, N., Rodríguez, C., Franco, J.C., Betancourth, E., Olaya, E. Posada, E. & Cárdenas, L. (2007). *Atlas de páramos de Colombia*. Bogotá, D. C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 208 p.
- Nosetto, M., Jobbágy, B. & Paruelo, J. (2005). Land use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*, 11(7), 1-17. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2005.00975.x/abstract>;
- Rodríguez, N., Pabón, J.D., Bernal, N.R. & Martínez, J. (2010). *Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos*. Bogotá, D. C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. 80 p.
- Sala, O.E., Chapin, I.F., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.H., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Leroy Poff, N., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M. & Wall, D.H. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287 (5459), 1770–1774.
- Sentis, I. (1994). La materia orgánica y la degradación y erosión de suelos en el trópico. En *Memorias del VII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bucaramanga. Colombia.
- Serrano, C., Páez, E. & Ramírez, L. (2008, junio). *Situación de los páramos en Colombia frente a la actividad antrópica y el cambio climático. Informe preventivo*. Instituto de Estudios del Ministerio Público Procuraduría Delegada para Asuntos Ambientales y Agrarios. 170 p. Recuperado de <http://fundacionecoan.org/Documentos/Eventos/libro4.pdf>.
- Sevink, J. (2009). Los páramos y sus reservas de carbono. En *Memorias Taller regional de cuantificación y estimación de los stocks de carbono en ecosistemas de alta montaña*. Lima, Perú. Recuperado de http://www.condesan.org/ppa/sites/default/files/recursos/archivos/carbono_paramos-taller-SGCAN.pdf
- Van der Hammen. 2002. Diagnóstico, cambio global y conservación. En *Memorias Congreso Mundial de Páramos*. Paipa, Colombia. Tomo I. (pp. 60-7). Recuperado de: http://bibdigital.rjb.csic.es/PDF/Fernandez_Paramos_Colombia_2002.pdf.
- Zhao, M., Pitman, A. & Chase, T. (2001). Climatic effects of land cover change at different carbon dioxide levels. *Clim Res*.17, 1–18.