

# Actualización y ajuste de la información obtenida en el Estudio de Factibilidad del Seguro Agrícola Catastrófico para el cultivo de maíz blanco tradicional en los departamentos de Antioquia y Tolima

CONTRATO 95-2019

Producto 4: Información meteorológica actualizada en Antioquia y Tolima

Preparado para:



Julio de 2020



# Firma consultora

#### Colombia

INGENIAR CAD/CAE Ltda. Carrera 19A # 84-14 OF 504 Edificio Torrenova Tel. 57-1-691-6113 Fax 57-1-691-6102 Bogotá, D.C. www.ingeniar-risk.com





# Equipo de trabajo

# Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico

Omar Darío Cardona A.

Gabriel Andrés Bernal G.

Dirección General del Proyecto

Dirección científica INGENIAR

# Especialistas y Asesores - Grupos de Trabajo

**Héctor Mauricio Yepes Casanova** 

Especialista en proyectos productivos

María Alejandra Escovar

Especialista INGENIAR

**Sthefania Grajales** 

Especialista INGENIAR

John Fredy Molina

Especialista INGENIAR

**Claudia Villegas** 

Especialista INGENIAR

**Gladys Cardona Cortés** 

Especialista Agroecología

Diana González

Especialista INGENIAR

Paula Marulanda

Especialista INGENIAR

David Rincón

Especialista INGENIAR



# **TABLA DE CONTENIDO**

1	INTRODUCC	ION	1
	1.1 OBJETIVOS		1
2	FUENTES DE	INFORMACIÓN CLIMÁTICA	3
	2.1 ESTUDIO DE	FACTIBILIDAD – SEGURO AGRÍCOLA CATASTRÓFICO POR BANCO MUNDIAL	3
		NSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES	
		álogo Nacional de Estaciones	
		ilisis Climático para Colombia 1981-2010	
		enarios de Cambio Climático para Colombia	
	2.3 FUENTES DE	E INFORMACIÓN CLIMÁTICA SATELITAL	10
		RPS	
	2.3.2 Uni	versidad de Princeton	12
3	ACTUALIZAC	IÓN DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA PARA ANTIOQUIA Y TOLIMA	15
		IÓN	
		JRA	
		IABLES CLIMÁTICAS	
		liación de onda corta y onda larga	
		sión atmosféricanedad específicanedad específica	
		pcidad del viento	
		TOS ACTUALIZADA DEL CLIMA PARA ANTIOQUIA Y TOLIMA	
4	GENERACIÓ	N ESTOCÁSTICA DE SERIES CLIMÁTICAS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO	36
	4.1 METODOLO	OGÍA DE GENERACIÓN ESTOCÁSTICA DE SERIES CLIMÁTICAS	36
		IN DE SERIES CLIMÁTICAS PARA ANTIOQUIA Y TOLIMA	
5	INCORPORA	CIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO	44
	5.1 PROYECCIO	NES DEL MODELO HADGEM2-AO EN COLOMBIA, ANTIOQUIA Y TOLIMA	46
6	ACRÓNIMOS	5	53
7	REFERENCIA	S	54
Α.	1 EVAPOTRAN	SPIRACIÓN DE REFERENCIA	56
	A. 1.1 MÉTOD	O DE PENMAN-MONTEITH	56
	A. 1.2 PARÁMI	ETROS ATMOSFÉRICOS	57
	A. 1.2.1	Presión atmosférica P	57
		Constante psicrométrica $\gamma$	
		ATURA DEL AIRE	
		AD DEL AIRE	
		Presión media de vapor de la saturación <b>es</b>	
		Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor $m{\Delta}$ $m{\Omega}$	
		resion real de vapor <b>ea</b>	
		Radiación extraterrestre	
		Duración máxima de la insolación (N)	
		Radiación solar o de onda corta	
		Radiación neta de onda laraa	



A. 1.	5.5 Radiación neta	63
	VELOCIDAD DEL VIENTO	
A. 1.7	VARIABLES CLIMÁTICAS A PARTIR DE BASE DE DATOS UNIVERSIDAD DE PRINCETON	64
A. 1.8	EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA	65
A. 2 MET	ODOLOGÍA PARA SELECCIONAR MODELO DE CIRCULACIÓN GLOBAL	67
Δ 2 1	MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL CONSIDERADOS EN ESTE ESTUDIO	71



#### 1 Introducción

El presente proyecto considera la evaluación de riesgo para cultivos de maíz blanco en los departamentos de Antioquia y Tolima expuestos a riesgos de tipo hidrometeorológico. Para cada departamento se evalúa el riesgo de desastres de manera cuantitativa en términos de la reducción del rendimiento de la cosecha de maíz blanco, que incluye las estimaciones de pérdidas máximas probables y pérdidas promedio anuales. El desarrollo de este proyecto se basará en el enfoque metodológico indicado en los términos de referencia y complementariamente usando una metodología de análisis de riesgo probabilista que utiliza como herramienta principal la plataforma CAPRA (*Comprenhensive Approach to Probabilistic Risk Assessment*) desarrollada por el equipo consultor en el marco de una iniciativa o estrategia regional para fortalecer y consolidar un proceso técnico-científico, idóneo, versátil y efectivo de evaluación del riesgo para el sector agropecuario con fines de avanzar en el conocimiento y la toma de decisiones.

En resumen, el proyecto "Actualización y ajuste de la información obtenida en el estudio de factibilidad del seguro agrícola catastrófico" se divide en seis actividades principales a desarrollar en un plazo de 12 meses. Las actividades son:

- Actividad 1. Determinar el número de productores objeto del esquema del seguro agrícola catastrófico en Antioquia y Tolima
- Actividades 2 y 3. Identificación de áreas establecidas de maíz blanco tradicional en Antioquia y Tolima, para los dos semestres productivos; e Identificación de fechas de siembra y cosecha de maíz blanco tradicional en Antioquia y Tolima, para los dos semestres productivos
- Actividad 4. Actualización de la información meteorológica en Antioquia y Tolima
- Actividad 5. Actualización de los rendimientos sintéticos obtenidos en el estudio de factibilidad para Antioquia y Tolima, para los dos semestres productivos
- Actividad 6. Piloto de muestreo en campo

# 1.1 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es actualizar y ajustar la información obtenida en el estudio de factibilidad del seguro agrícola catastrófico para el cultivo de maíz blanco tradicional en los departamentos de Antioquia y Tolima.

La consultoría se enfocará en la actualización de la información por medio de:

i) Estimación de número de productores objeto del esquema del seguro agrícola catastrófico en los dos departamentos seleccionados



- La identificación de las áreas establecidas de maíz blanco tradicional en cada uno de los departamentos seleccionados para los dos semestres productivos, así como las fechas más probables de siembra y cosecha
- iii) La información meteorológica de los departamentos seleccionados
- iv) Los rendimientos sintéticos a partir de la información disponible para los dos departamentos

Igualmente, con el objetivo de determinar rendimientos reales en campo en Antioquia y Tolima se llevará a cabo un piloto de muestreo en campo siguiendo el Manual de Procedimiento para la Estimación de Rendimientos y Evaluación de Daños del SAC y Método de Muestreo con Números Aleatorios. Estimación de Rendimientos y Evaluación de Daños disponible en el Estudio de Factibilidad Seguro Agrícola Catastrófico en Colombia.

Este informe contiene los resultados de la Actividad 4 Actualización de la información meteorológica en Antioquia y Tolima. En la primera parte se presenta la revisión de fuentes de información climática que incluye el análisis de información del IDEAM y de bases de datos satelitales de clima. Luego se presentan los resultados de la actualización de la información histórica del clima en Antioquia y Tolima, que incluye los valores medios multianuales respresentados espacialmente en mapas. Luego se presenta la metodología que genera series estocásticas de variables climáticas que se utilizan para evaluar, con un enfoque probabilista, amenazas hidrometeroloógicas que pueden generar pérdidas en el sector agropecuario. En la sección final del documento se presenta la metodología y resultados de la incorporación de las proyecciones de cambio climático para Antioquia y Tolima.



#### 2 Fuentes de Información Climática

En esta sección se presenta un resumen de las fuentes de información climática consultadas para actualizar la base de datos de variables meteorológicas de Antioquia y Tolima.

### 2.1 Estudio de Factibilidad – Seguro Agrícola Catastrófico por Banco Mundial

El Estudio de Factibilidad del Seguro Agrícola Catastrófico en Colombia (FINAGRO & Banco Mundial, 2017) concluyó que no era recomendable hacer uso de la información climática de las Estaciones Meteorológicas Convencionales (EMC) del IDEAM por falta de registros históricos continuos en el tiempo. Los autores concluyeron que sólo Antioquia y Santander tienen estaciones en tierra con registros de buena calidad, lo que impide replicar el análisis a otros departamentos del país.

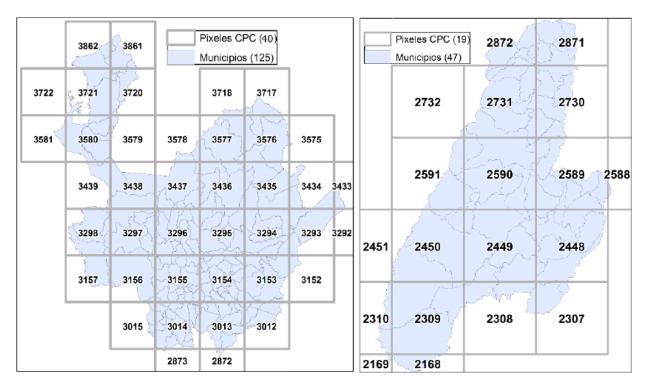
Para adelantar el Estudio de Factibilidad, los autores utilizaron la base de datos Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)¹ del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP por sus siglas en inglés) de la NOAA para obtener registros históricos de precipitación. Esta información se publica en una resolución espacial de 0.5° de latitud x 0.5° de longitud para el rango de tiempo entre enero de 1979 hasta marzo de 2011. Por otro lado, los registros históricos de temperatura se tomaron del proyecto MERRA²: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications de la NASA. Esta información se publica en una resolución espacial de 0.5° de latitud y 0.66° de longitud para el rango de tiempo entre enero de 1979 hasta febrero de 2016. Entre las ventajas de utilizar estas bases de datos se menciona el acceso libre, la cobertura del área de estudio, la coincidencia de los rangos de tiempo con información disponible y que las dos bases de datos publican registros a escala horaria. Sin embargo, la resolución espacial de las dos bases de datos es diferente, por lo que los autores unificaron las mallas de precipitación y temperatura, con una reasignación de los pixeles de la malla de temperatura al pixel más cercano de la malla de precipitación.

La base de datos climática resultante unificó la información de la base de datos de precipitación CFSR y de temperatura MERRA en un mismo arreglo regular para Antioquia y Tolima, como se muestra en la Figura 2-1. En la Figura 2-2 se muestran los resultados de la normal climática (promedio multianual) para las variables de precipitación, temperatura máxima y mínima. Los registros históricos de estas bases de datos se utilizaron para la construcción de la base sintética de rendimientos del maíz blanco tradicional.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Más información en: <a href="https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2">https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2</a>

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Más información en: <a href="https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/">https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/</a>





**Figura 2-1. Malla para la base de datos climática en el Estudio de Factibilidad** (Figura 2 en FINAGRO & Banco Mundial, 2017)

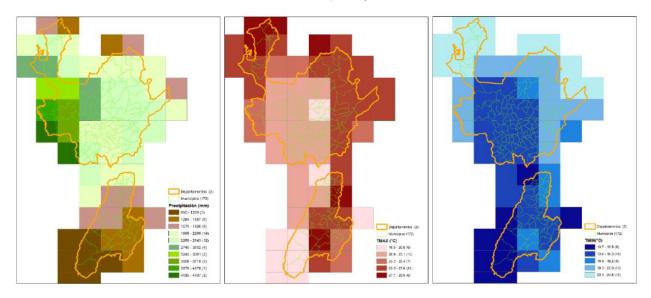


Figura 2-2. Normal climática 1979-2015 de Precipitación (izquierda), Temperatura Máxima (centro) y Temperatura Mínima (derecha) (Figura 4 en FINAGRO & Banco Mundial, 2017)



# 2.2 IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

## 2.2.1 Catálogo Nacional de Estaciones

El IDEAM es la institución pública para la producción de información meteorológica en Colombia. Según el Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM (IDEAM & MinTIC, 2020) hay 8,973 estaciones en el país que incluyen estaciones climáticas y limnigráficas, de las cuales activas hay 5,491, como se muestra en la Tabla 2-1. Estas estaciones no son todas administradas por el IDEAM, también hacen parte de las redes de medición de parámetros climáticos de Corporaciones Autónomas Regionales, Empresas de Servicios Públicos, entidades privadas, centros de investigación y universidades, entre otros. Las estaciones de tiempo y niveles que están bajo la administración del IDEAM son 4,442, según lo consignado en el Catálogo.

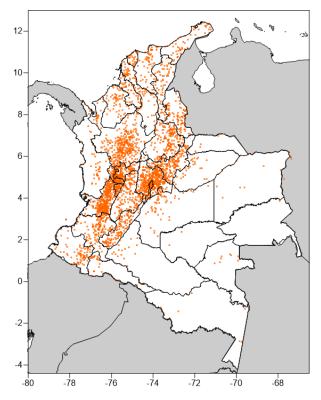
Tabla 2-1. Tipo y Estado de estaciones del Catálogo Nacional del IDEAM (IDEAM & MinTIC, 2020)

Tipo	Activa	En Mantenimiento	Suspendida	Total general
Agrometeorológica	57	1	16	74
Climática Ordinaria	401	8	478	887
Climática Principal	576	1	103	680
Limnigráfica	853	18	269	1140
Limnimétrica	898	3	846	1747
Mareográfica	31	1	17	49
Meteorológica Especial	94		72	166
Pluviográfica	460	8	163	631
Pluviométrica	2074	2	1457	3533
Radio Sonda	11		3	14
Sinóptica Principal	31	1	5	37
Sinóptica Secundaria	5		10	15
Total	5491	43	3439	8973

Las estaciones de medición de tiempo que a la fecha están activas son 3,477 en todo el país, ubicadas como se muestra en el mapa de la Figura 2-3. De estas, 2,049 estaciones están activas y tienen información cómo mínimo desde enero de 1981. En Antioquia están ubicadas 227 de estas estaciones y en Tolima son 74 estaciones. Al ser estaciones en su mayoría Convencionales, se espera que todas las estaciones no tengan datos completos.

La distribución espacial de las estaciones del Catálogo nacional no es homogéneo en todo el territorio, por lo que podría complicar la extrapolación de medición de variables climáticos en muchos departamentos del país (en especial en las regiones de la Amazonía y Orinoquia), en el que la densidad de estaciones meteorológicas es muy baja. Esta disparidad en la densidad de estaciones meteorológicas en el país es una buena razón para preferir el uso de información climática de bases de datos satelitales y de reanálisis para asegurar una buena distribución de las variables como la precipitación y temperatura.





**Figura 2-3. Localización de estaciones de medición de tiempo activas** (Elaboración propia a partir de IDEAM & MinTIC, 2020)

## 2.2.2 Análisis Climático para Colombia 1981-2010

Como parte de las actividades de seguimiento del clima en Colombia, el IDEAM publica el análisis climático para diferentes periodos de tiempo (IDEAM, 2020). Entre los mapas disponibles están los promedios multianuales para el periodo comprendido entre 1981 y 2010, en la Figura 2-4 se muestra la precipitación total anual, en la Figura 2-5 se muestra la temperatura media, la Figura 2-6 muestra la temperatura máxima y mínima y la Figura 2-7 muestra el valor promedio de evapotranspiración total anual. Estos mapas son de gran utilidad para conocer el comportamiento del clima en el país y validar los valores registrados en bases de datos de variables climáticas satelitales.



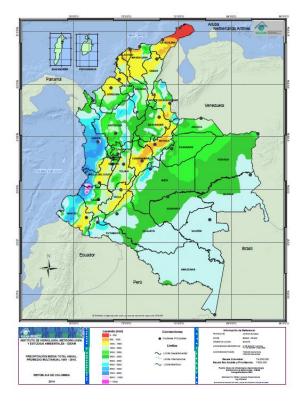


Figura 2-4. Precipitación Media Total Anual Promedio Multianual 1981-2010 (IDEAM, 2020)

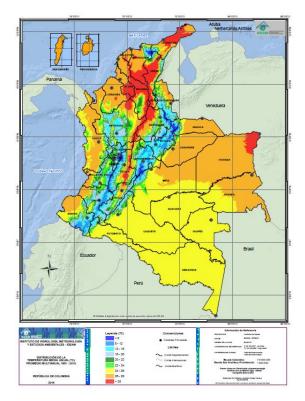


Figura 2-5. Temperatura Media Anual Promedio Multianual Periodo 1981-2010 (IDEAM, 2020)



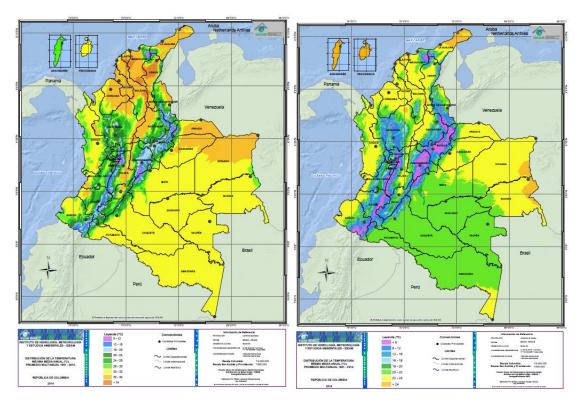


Figura 2-6.Temperatura Maxima (derecha) y Mínima (izquierda) Promedio Multianual 1981-2010 (IDEAM, 2020)

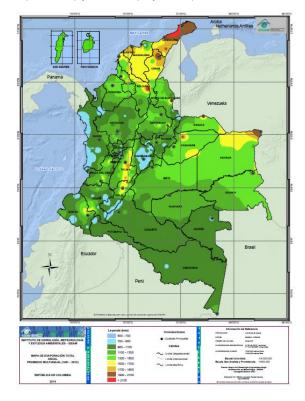


Figura 2-7. Evaporación Total Anual Promedio Multianual Periodo 1981-2010 (IDEAM, 2020)



# 2.2.3 Escenarios de Cambio Climático para Colombia

El IDEAM es la institución encargada de investigar las evidencias del cambio climático en Colombia y ha elaborado escenarios de climáticos que pueden presentarse en las próximas décadas en el país. En el documento Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia (Ruíz Murcia et al., 2015), parte de la Tercera Comunicación Nacional para la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se presentan escenario de clima 2011-2100. Estos escenarios indican un incremento hasta de 3.2°C para el periodo 2071-2100, y una reducción entre 15% y 36% para las regiones Caribe y Andina. Este documento también presenta información detallada a nivel departamental, presentada en formato de fichas, como la que se muestra en la Figura 2-8 para Antioquia y en la Figura 2-9 para Tolima. Estos valores son útiles para evaluar el riesgo por amenazas hidroclimáticas considerando los efectos del cambio climático.

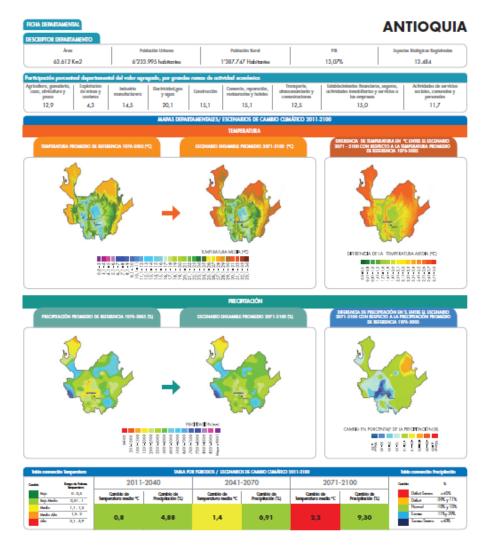


Figura 2-8. Ficha Departmental para Antioquia de Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 (Ruíz Murcia et al., 2015)



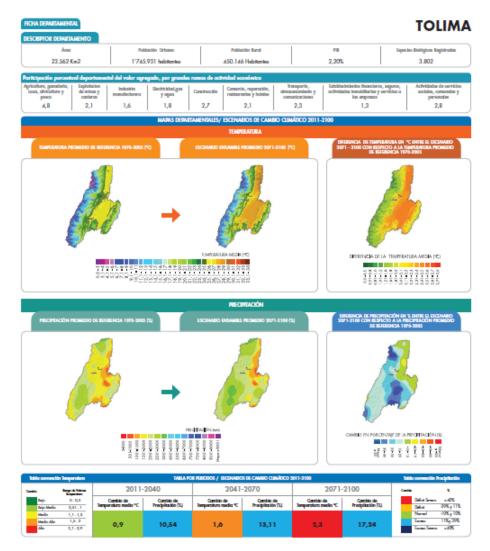


Figura 2-9. Ficha Departmantal para Tolima de Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 (Ruíz Murcia et al., 2015)

#### 2.3 Fuentes de información climática satelital

Dado que la disponibilidad y acceso a la información climática oficial son limitados para este estudio según el análisis de la información disponible del IDEAM y las conclusiones del Estudio de Factibilidad, y con el propósito de desarrollar una metodología que se pueda replicar en todos los departamentos de Colombia, se propone el uso de bases de datos de registros de variables climáticas derivadas de información satelital procesada por agencias internacionales como las bases de datos CHIRPS y de la Universidad de Princeton.

Las ventajas de utilizar este tipo de base de datos incluyen que la información está completa en las dimensiones temporales y espaciales, son bases de datos usadas ampliamente por científicos a nivel mundial para el análisis del clima y de amenazas hidroclimáticas, y se cuenta con múltiples parámetros climáticos para el cálculo de la evapotranspiración. En la Figura 2-10 se muestra la



malla de puntos de 0.5°x0.5° que compone la base de datos de información climática para Colombia. En cada uno de los puntos de la malla se tiene información de precipitación total diaria de CHIRPS y temperatura (media, mínima y máxima), radiación solar (de onda corta y de onda larga), velocidad de viento, presión atmosférica y humedad específica del dataset de la Universidad de Princeton.

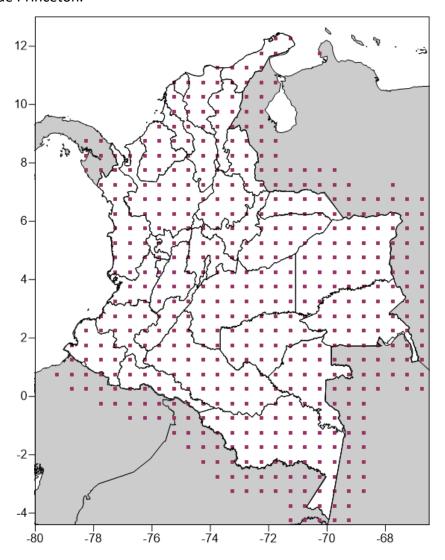


Figura 2-10. Localización de estaciones virtuales de bases de datos satelitales en malla de 0.5°x0.5° (Elaboración propia)

#### 2.3.1 **CHIRPS**

La base de datos CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) cuenta con información global (50°S-50°N para todas las longitudes) de registros diarios de precipitación iniciando en el año 1981 hasta la fecha (Funk et al., 2015). Esta base de datos incorpora información satelital con información de estaciones para generar series de tiempo para el análisis



de tendencias y el monitoreo de sequias estacionales. La información global diaria en la versión 2.0 se puede descargar gratis de <a href="ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0">ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0</a>. Para este estudio se utilizó la información en formato raster (archivos de extensión tiff) y de resolución 0.5°x0.5°. El mapa de la izquierda de Figura 2-11 muestra el promedio, entre los años 1981 a 2010, de la precifitación total anual en Colombia. La escala de colores indica precipitación anual entre 0 (rojo) y 10,000 (rosa) milímetros de lluvia. El mapa de la derecha muestra la precipitación máxima diaria que se registró entre 1981 y 2010, con rango entre 0 y 200 mm/día. Entonces, con CHIRPS se cuenta con información en la totalidad del país, completa para 30 años en la ventana de tiempo entre 1981 a 2010.

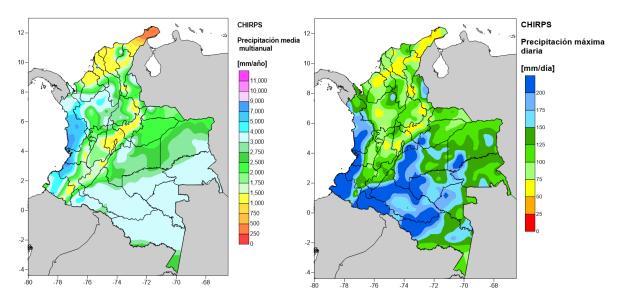


Figura 2-11. Valores multianuales de Precipitación total anual (izquierda) y Precipitación máxima diaria (derecha) entre 1981 y 2010 (Elaboracion propia a partir de datos de Funk et al., 2015)

#### 2.3.2 Universidad de Princeton

El Grupo de Investigación de Hidrología Terrestre de la Universidad de Princeton generó un dataset meteorológico global para la modelación en la superficie terrestre. Esta base de datos provee información meteorológica (que incluye precipitación y temperatura) cercana a la superficie resultado de reanálisis de observaciones en el periodo 1901-2012 (para la Versión 2), en mallas de resolución de 1°, 0.5° y 0.25°. La información global diaria en la versión 2.0 se puede descargar gratis de <a href="http://hydrology.princeton.edu/data.pgf.php">http://hydrology.princeton.edu/data.pgf.php</a>. La información disponible está en formato NetCDF (archivos de extensión nc) y para este estudio se utilizaron las mallas de resolución 0.5°x0.5°, que coincide con el dataset de CHIRPS.

En la Figura 2-12 se muestra el promedio anual de registros de temperatura diaria, media, máxima y mínima, para Colombia según esta base de datos climática. Como con la base de datos de CHIRPS, se cuenta con información en la totalidad de área de estudio de registros diarios para 30 años en la ventana de tiempo entre 1981 a 2010.



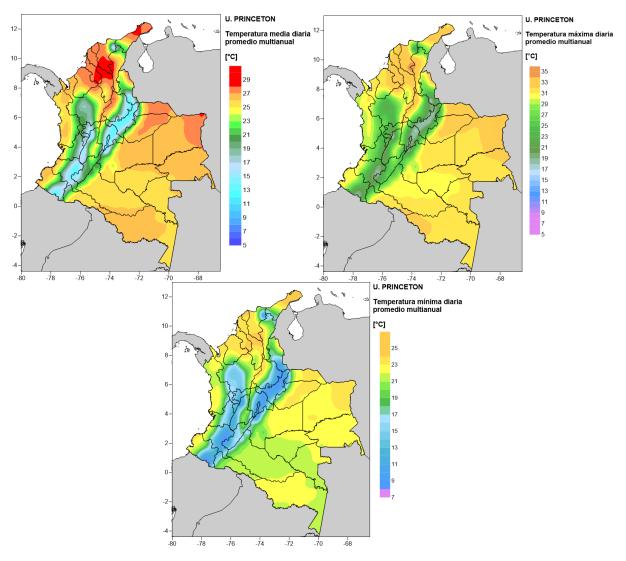


Figura 2-12. Valores multianuales de Temperatura media (arriba izquierda), máxima (arriba derecha) y mínima (abajo) entre 1981 y 2010 (Elaboración propia a partir de Funk et al., 2015)

Otra ventaja de la base de datos desarrollada por la Universidad de Princeton es que incluye múltiples parámetros climáticos, registrados en la misma resolución espacial y temporal. Los parámetros disponibles son precipitación, temperatura (media, mínima y máxima), radiación de onda corta y de onda larga, humedad específica, presión de aire en la superficie y velocidad del viento, que son ajustadas a los cambios de elevación. Estas variables son útiles para el cálculo de la evapotranspiración, que es un parámetro importante para la modelación de sequias y de la vulnerabilidad de los cultivos. El resultado del cálculo para la Evapotranspiración Potencial total anual, promedio entre 1981 y 2010 se muestra en el mapa de la Figura 2-13.



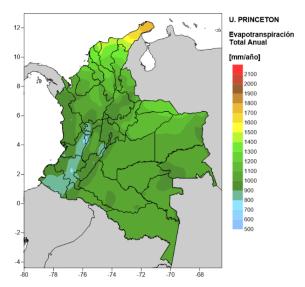


Figura 2-13. Valores multianuales de Evapotranspiración total anual entre 1981 y 2010 calculada a partir de registros del dataset de U. de Princeton (Elaborado a partir de Sheffield, Goteti, & Wood, 2006)



# 3 Actualización de la información climática para Antioquia y Tolima

La información climática para Antioquia y Tolima se derivó de los registros de las bases de datos globales CHIRPS para precipitación y de la Universidad de Princeton para temperatura y otras variables meteorológicas necesarias para el cálculo de la Evapotranspiración Potencial. La ventana de tiempo seleccionada fue entre 1981 y 2010. Esta ventana permite tener 30 años de información histórica y fue seleccionada porque CHIRPS inicia su registro en el año 1981, por lo que no se cuentan con información para fechas anteriores. Además, el rango de 30 años de 1981 a 2010 es considerado como período de referencia actual según el Congreso Meteorológico Mundial(World Meteorological Organization (WMO), 2015), que se actualiza cada 10 años.

Los registros de las bases de datos se compararon con los registros de estaciones en tierra para validar su uso. Esta sección presenta las comparaciones entre las estaciones virtuales con estaciones en tierra cercanas y también muestra los resultados, en mapas, de las variables meteorológicas, para Antioquia y Tolima. Los registros de las estaciones en tierra se obtuvieron del Banco de Datos del IDEAM<sup>3</sup>. Los archivos en los que se muestran las comparaciones entre las estaciones en tierra y las estaciones virtuales van como archivos digitales adjunto a este documento.

La Tabla 3-1 presenta el porcentaje de datos faltantes en la serie de registros de temperatura media y la Tabla 3-2 presenta el mismo porcentaje en la serie de registros de precipitación. Se puede ver por qué es difícil hacer comparaciones robustas entre los datos de estaciones en tierra y estaciones virtuales, porque los datos faltantes son muy altos, especialmente para los registros de temperatura.

Tabla 3-1. Porcentaje de datos completos para los registros de temperatura de estaciones del IDEAM

Antioquia			
Estación	% datos faltantes		
Aeropuerto Los Cedros	18.4%		
Aeropuerto Puerto Berrio	18.1%		
Cañasgordas	36.7%		
Guayabito	14.2%		
Mesopotamia	26.9%		
San Francisco	37.7%		
Santa Isahel	40.9%		

Tolima				
Estación	% datos faltantes			
Aeropuerto Planadas	74.7%			
Aeropuerto Santiago Vila	29.0%			
Granja Demostracion	43.6%			
El Salto	26.8%			
Guamo	42.1%			
Jabalcon	42.9%			
Media Luna	14.7%			

Producto 4: Información meteorológica actualizada en Antioquia y Tolima · 15

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Descraga libre disponible en http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/



Tabla 3-2. Porcentaje de datos completos para los registros de precipitación de estaciones del IDEAM

Antioquia				
Estación	% datos faltantes			
Aeropuerto Los Cedros	10.0%			
Aeropuerto Puerto Berrio	2.8%			
Guayabito	1.0%			
Ita Andes	0.9%			
La Aldea	33.6%			
Mesopotamia	2.3%			
San Francisco	1.2%			
Santa Isabel	2.8%			
Sonson	0.4%			

Tolima				
Estación	% datos faltantes			
Aco	2.9%			
Aeropuerto Planadas	35.0%			
Aeropuerto Santiago Vila	2.3%			
El Darien	17.7%			
El Palmar	3.1%			
El Placer	10.7%			
El Rancho	31.9%			
El Salto	8.4%			
El Secreto	18.0%			
Granja Demostracion	0.5%			
Guamo	9.6%			
Jabalcon	3.8%			
La Esmeralda	7.3%			
Las Juntas	4.8%			
Media Luna	7.1%			
Pastales	15.2%			

# 3.1 Precipitación

Los mapas de la Figura 3-1 muestran la ubicación de las estaciones virtuales (en verde) y las estaciones en tierra (en rojo) que se utilizaron para hacer comparaciones de los estadísticos de las series diarias, mensuales y anuales.

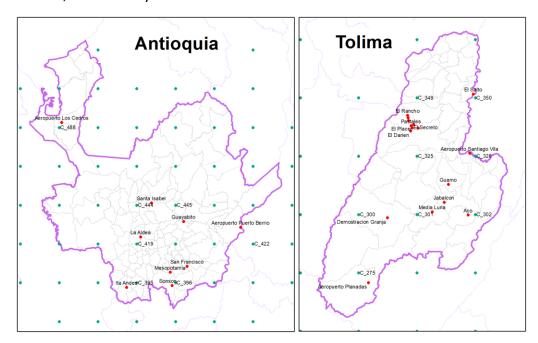
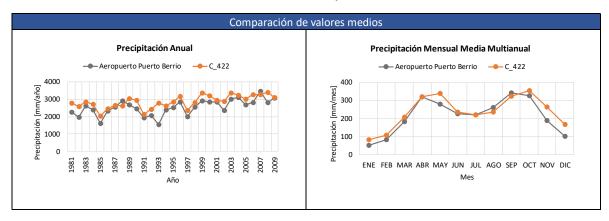


Figura 3-1. Ubicación de las estaciones de precipitación. Los puntos verdes representan las estaciones satelitales (CHIRPS) y los puntos rojos las estaciones terrestres pertenecientes al IDEAM.



A modo de ejemplo se presenta la comparación realizada para la precipitación entre la estación Aeropuerto Puerto Berrio y la estación satelital C\_422 (Antioquia), y Aeropuerto Santiago Vila vs C\_326 (Tolima). Analizando los datos de manera anual y mensual se puede observar en la Figura 3-2 como las estaciones terrestres (IDEAM) y las estaciones satelitales (CHIRPS), se mantienen dentro de un rango similar durante todo el periodo de tiempo, es decir, la precipitación anual y mensual media multianual de ambas estaciones coincide con la variabilidad climática bimodal de la zona de estudio. También se observan los acercamientos entre los máximos y mínimos en la serie histórica, y hay concordancia entre los meses de baja y mayor precipitación. Lo anterior es un paso que permite validar preliminarmente el uso de la información satelital ya que representa muy bien los datos obtenidos por las estaciones locales.

#### **ANTIOQUIA**



#### **TOLIMA**

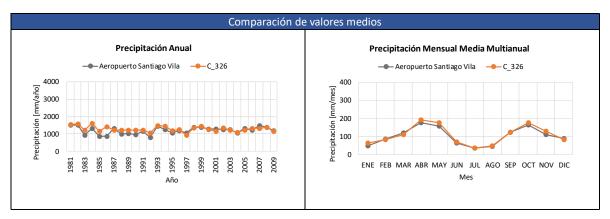


Figura 3-2. Comparación de los valores anuales y mensuales de precipitación.

Para validar mejor esta información se realizaron diferentes pruebas estadísticas de los valores diarios que se muestran en la Tabla 3-3. Se observan similitudes entre los días sin lluvia; la estación Aeropuerto Puerto Berrio con 47% frente a 50% en la estación C\_422, y 65% en Aeropuerto Santiago Vila vs 71% en C\_326. La media de los datos presenta gran similitud, en Aeropuerto Puerto Berrio 7.16 mm/día y en C\_422 7.83 mm/día, en Aeropuerto Santiago Vila 3.37 mm/día y 3.52 mm/día en C\_326. Sin embargo, la cantidad de datos faltantes en las



estaciones terrestres afectan el análisis, incrementando la incertidumbre en la modelación. Existen estaciones con pocos datos faltantes entre 1% y 3%, pero otras superan el 30% de vacíos como Aeropuerto Planadas con 35%, La Aldea con 33.6% o El Rancho con 31.9%. Este es uno de los factores más importantes para decidir realizar la modelación con las estaciones satelitales, ya que permiten tener información completa diaria. Se aprecia también como las estaciones satelitales tienden a subestimar los máximos de precipitación.

Tabla 3-3. Análisis estadístico diario de precipitación

#### **ANTIOQUIA**

Análisis Estadístico Diario				
	Métrica	Aeropuerto Puerto Berrio	C_422	
Máximo	[mm/día]	182	113	
Media	[mm/día]	7.16	7.83	
Mediana	[mm/día]	0.30	0.00	
Percentil 90	[mm/día]	23.20	23.32	
Percentil 75	[mm/día]	5.60	12.98	
Ceros	[-]	47%	50%	
Datos faltantes	[-]	3%	0%	

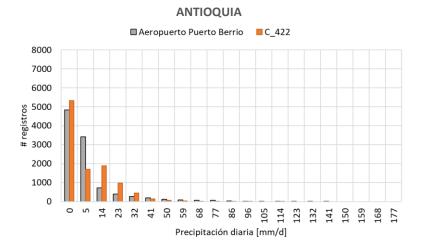
#### **TOLIMA**

Análisis Estadístico Diario					
Mét	rica	Aeropuerto Santiago Vila	C_326		
Máximo	[mm/día]	136	88		
Media	[mm/día]	3.37	3.52		
Mediana	[mm/día]	0.00	0.00		
Percentil 90	[mm/día]	9.20	12.86		
Percentil 75	[mm/día]	1.20	4.33		
Ceros	[-]	65%	71%		
Datos faltantes	[-]	2%	0%		

Comparando los histogramas entre las estaciones se aprecia de forma gráfica como los días sin lluvia son cercanos, hay diferencias entre la cantidad de valores de precipitación menores a 5 mm/d, esto puede deberse a que la estación satelital puede no ser capaz de capturar estas precipitaciones pequeñas que ocurren diariamente, sin embargo, para los valores extremos, los cuales permiten modelar periodos de inundaciones o sequía, sí se comporta muy bien, como se presenta en la Figura 3-3.

En la Figura 3-4 se puede observar como la dispersión de los datos entre las estaciones no es muy alta y tienden a concentrarse los puntos sobre la línea, representando una tendencia lineal sin mucha diferencia entre los valores. Para la pareja de estaciones Aeropuerto Puerto Berrio vs C\_422 la relación lineal es más débil comparada con la pareja Aeropuerto Santiago Vila vs C\_326.





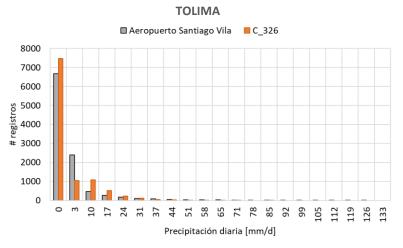


Figura 3-3. Histogramas de precipitación diaria

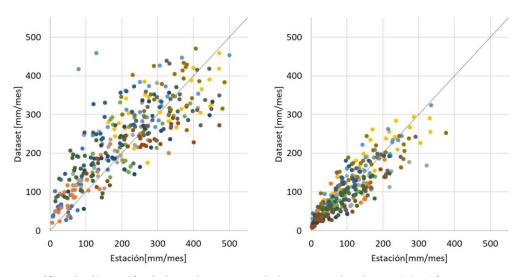


Figura 3-4. Gráfico de dispersión de los valores acumulados mensuales de precipitación. Aeropuerto Puerto Berrio vs C\_422 (Izquierda), Aeropuerto Santiago Vila vs C\_326 (Derecha)



Al realizar la comparación anual se encontró un comportamiento similar entre las estaciones analizadas, fluctúan un poco los extremos variando en el tiempo, pero en general todas las estaciones satelitales se mantienen dentro de un rango similar comparadas con las estaciones terrestres, respetando los periodos de mayor y menor precipitación, como se muestra en la Figura 3-5 para el año 2007.

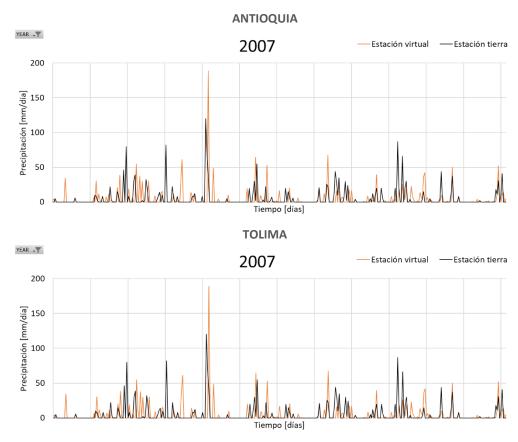


Figura 3-5. Comparación de los valores diarios entre las estaciones para el año 2007. Aeropuerto Puerto Berrio vs C\_422 (Arriba), Aeropuerto Santiago Vila vs C\_326 (Abajo)

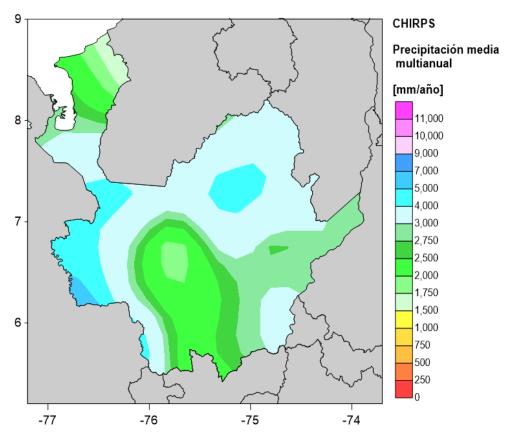
En términos generales, el dataset de CHIRPS tiene mejor comportamiento al agregar sus registros a escalas mensuales o anuales, reflejando mejor el comportamiento registrado en estaciones en tierra. CHIRPS tiene dificultades para representar los valores diarios de forma precisa. A estas mismas conclusiones llegó en un ejercicio de validación de CHIRPS en Colombia, en el que se encontró un buen desempeño de la base de datos al compararlo con 338 estaciones en tierra administradas por IDEAM (R=0.97 y MAE=38 mm) (Funk et al., 2015) y se comprobó su buen uso para la identificación de sequías. En un análisis descriptivo y comparativo para Colombia que consideró 902 estaciones del IDEAM (Urrea, Ochoa, & Mesa, 2017), se concluyó que CHIRPS conserva características importantes de precipitación como la media y la estacionalidad para escala anual, mensual y diaria, aunque la varianza se representa mejor a escala mensual y anual. Este estudio encontró que CHIRPS sobreestima los valores de precipitación en la región Andina y



Pacífica, mientras que subestima las precipitaciones en La Guajira, la Región de la Orinoquía y Amazonía. Además, CHIRPS acierta en más de un 60% los días de lluvia y de no lluvia.

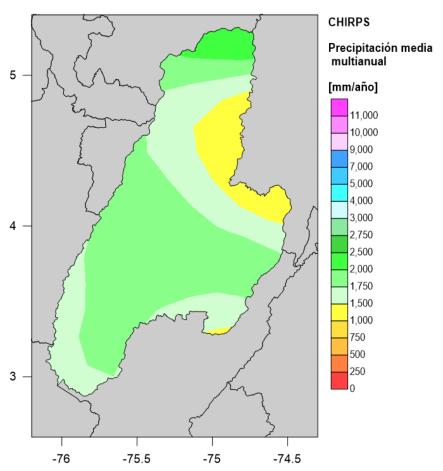
Se han adelantado iniciativas para mejorar la calidad de los registros de CHIRPS a escala diaria (Verdin, Rajagopalan, Kleiber, & Funk, 2015), y en el caso colombiano el IDEAM está generando mapas de seguimiento de la lluvia decadal CHIRPS-IRE/IDEAM, pero esta información no está disponibles para acceso libre. A pesar de estas limitaciones, se considera que CHIRPS tiene fortalezas para su uso en la evaluación de riesgo, entre las que se reconoce la alta resolución espacial y temporal, y que se representan bien los valores medios multianuales, la estacionalidad y la precipitación acumulada total, que son los indicadores seleccionados para medir el ajuste de las simulaciones en esta metodología. Esto se hace considerando que la evaluación de la amenaza por eventos hidrometeorológicos no tiene como objetivo hacer pronósticos de clima o de la ocurrencia de eventos extremos, sino generar estocásticamente eventos que se puedan presentar, deriven en peligros y desastres, y permitan estimar sus pérdidas.

Los mapas de la Figura 3-6 y la Figura 3-7 muestran el resultado de la estimación de la precipitación total anual para Antioquia y Tolima, respectivamente. Esta es la media de precipitación anual registrada entre 1981 y 2010.



**Figura 3-6. Precipitación total anual media para los años 1981-2010 en Antioquia** (Fuente: Elaboración propia a partir de registros de Funk et al., 2015)





**Figura 3-7. Precipitación total anual media para los años 1981-2010 en Tolima** (Fuente: Elaboración propia a partir de registros de Funk et al., 2015)

Estos mapas son equivalentes a los presentados en la Figura 2-4, que presenta la misma media de precipitación anual estimada por el IDEAM. Su similitud indica que en la dimensión espacial el dataset de CHIRPS también representa de forma precisa el régimen de precipitación de cada departamento. La comparación de los mapas para los dos departamentos en estudio se presenta en la Figura 3-8.



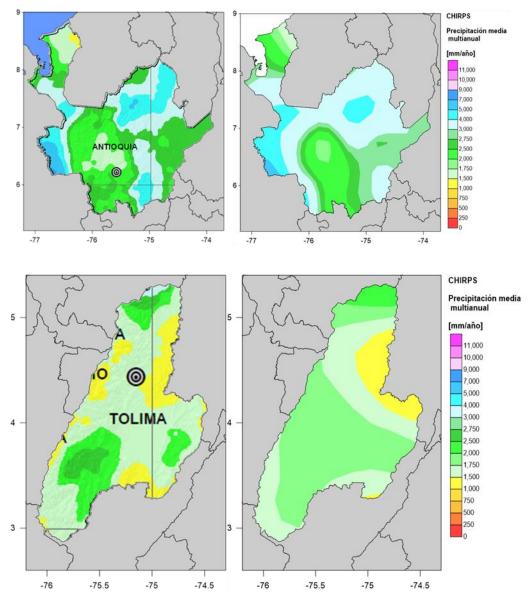


Figura 3-8. Comparación entre mapa de IDEAM (izquierda) y CHIRPS (derecha) de la precipitación total anual, promedio para el rango 1981-2010.

# 3.2 Temperatura

Los mapas de la Figura 3-9 muestran la ubicación de las estaciones virtuales (en verde) y las estaciones en tierra (en rojo) que se utilizaron para hacer comparaciones de los estadísticos de las series diarias, mensuales y anuales.



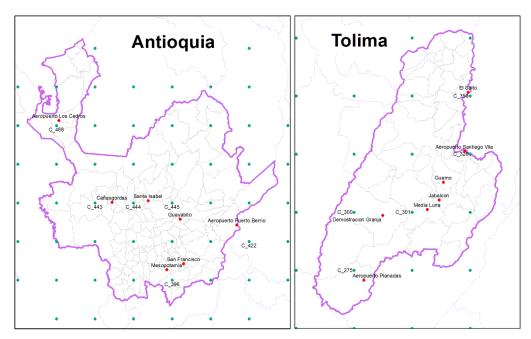


Figura 3-9. Ubicación de las estaciones de temperatura. Los puntos verdes representan las estaciones satelitales (Princeton) y los puntos rojos las estaciones terrestres pertenecientes al IDEAM.

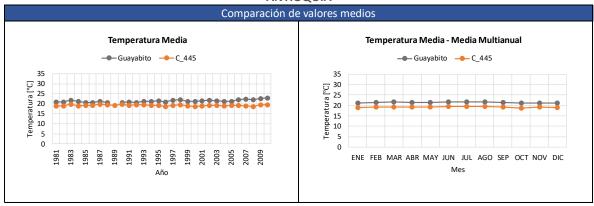
A modo de ejemplo, en la Figura 3-10 se presenta la comparación de temperatura entre la estación Guayabito y la estación satelital C\_445 (Antioquia), y El Salto vs C\_350 (Tolima), procedimiento realizado de igual forma para todas las estaciones.

En la estación Guayabito se observan unos datos faltantes alrededor del año 1989, esto se presenta en general en todas las estaciones terrestres con varios días, meses o incluso años de datos faltantes. En general para todas las estaciones en la comparación de temperatura se observó una diferencia aproximada hasta de 3°C entre los datos, pero que es consistente en toda la serie de tiempo en las escalas diarias, mensuales y anuales. Las variaciones mensuales con los meses más cálidos se mantienen.

Como se mencionó anteriormente, tanto para la precipitación como para la temperatura, las estaciones terrestres presentan un número de datos faltantes durante todo el periodo del registro analizado. En la Tabla 3-4 se pueden comparar el número de registros en blanco para la temperatura en la estación Guayabito (14.2%) y El Salto (26.8%). En general, en las estaciones analizadas estos valores se encuentran entre 14% y 74%. Estaciones como Cañasgordas presentan 36.7% de datos faltantes, San Francisco 37.7%, Santa Isabel 40.9%, Granja Demostración 43.6%, Guamo 42.1%, Jabalcón 42.9% y Areopuerto Planadas 74.7%. Al presentar valores tan altos de datos faltantes, la modelación con estas estaciones generaría mucha incertidumbre, por esta razón se opta por usar las estaciones satelitales que presentan todos los valores diarios de información y además se encuentran repartidas uniformemente por todo el territorio, ya que las terrestres presentan mucha concentración en algunas zonas, pero en otras no se tiene ninguna.



#### **ANTIOQUIA**



#### **TOLIMA**

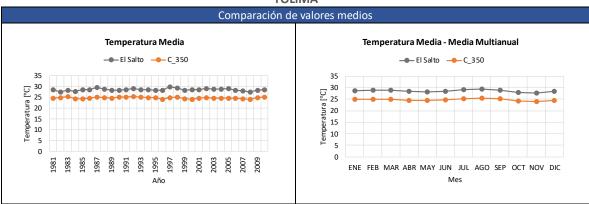


Figura 3-10. Comparación de los valores anuales y mensuales de temperatura

Tabla 3-4. Análisis estadístico diario de temperatura ANTIOQUIA

Análisis Estadístico Diario					
Métrica Guayabito C_445					
Máximo	[°C]	25.9	21.9		
Media	[°C]	21.4	19.2		
Mediana	[°C]	21.3	19.2		
Percentil 90	[°C]	22.9	20.1		
Percentil 75	[°C]	22.1	19.7		
Registros en blanco	[-]	14%	0%		

#### **TOLIMA**

Análisis Estadístico Diario					
Métrica El Salto C 350					
Máximo	[°C]	34.4	27.9		
Media	[°C]	28.5	24.7		
Mediana	[°C]	28.5	24.7		
Percentil 90	[°C]	30.7	25.7		
Percentil 75	[°C]	29.6	25.2		
Registros en blanco	[-]	27%	0%		



Al realizar la comparación de los histogramas diarios, se nota la diferencia de aproximadamente 3°C entre las estaciones. Sin embargo, se puede observar en la Figura 3-11 como la tendencia y forma de los datos es muy similar, aunque presentando valores más concentrados en las estaciones satelitales y distribuidos de una forma más uniforme en las estaciones terrestres.

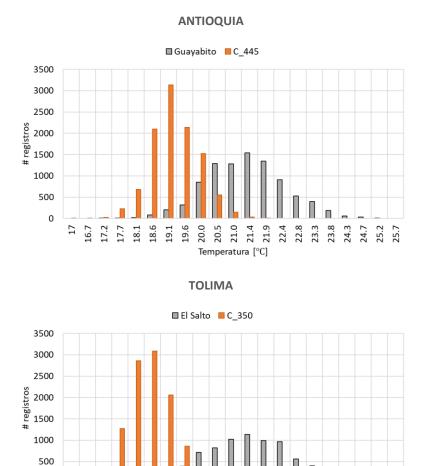


Figura 3-11. Histogramas de temperatura diaria

27.3 27.9 28.6 29.2 29.8

Temperatura [°C]

26.7

24.9

25.5

23.0 23.6 24.3

22

Los gráficos de dispersión presentes en la Figura 3-12 para las estaciones analizadas muestran un sesgo hacia las estaciones terrestres ya que presentan información con valores más altos de temperatura, sin embargo, se aprecia como los datos mantienen una tendencia lineal.

31.0 31.6 32.2

30.4



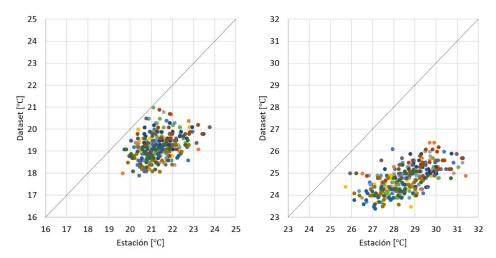


Figura 3-12. Gráfico de dispersión de los valores promedio mensuales de temperatura. Guayabito vs C\_445 (Izquierda), El Salto vs C\_350 (Derecha).

En la comparación anual de temperatura, ver Figura 3-13, se observa de nuevo como las estaciones terrestres presentan una serie de datos faltantes. Las tendencias de picos y variaciones diarias se mantienen entre las estaciones terrestres y satelitales, y las fluctuaciones entre los periodos de mayor y menor temperatura son coincidentes. Se puede ver como las dos series tienden a subir y bajar sincronicamente durante el tiempo.

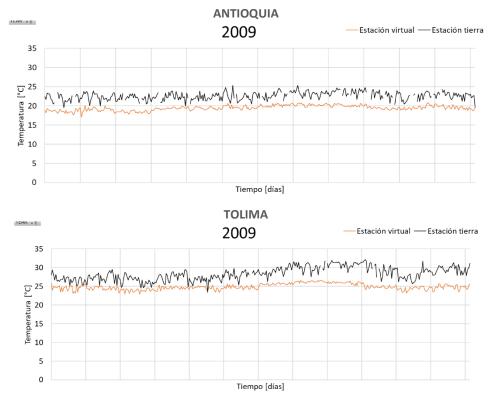


Figura 3-13. Comparación de los valores diarios entre las estaciones para el año 2009. Guayabito vs C\_445 (Arriba), El Salto vs C\_350 (Abajo).



A partir del análisis anterior se reconoce que existe una diferencia entre los registros de temperatura entre estaciones en tierra y virtuales. Esta diferencia, en gran medida, puede ser explicada por las diferencias en la elevación del terreno y se puede minimizar haciendo uso de técnicas estadísticas de mapeo del clima.

La corrección de los registros históricos de temperatura por elevación se hace siguiendo la metodología de Daly et al (2002; 2008), en la que se ajusta una regresión entre la temperatura y la altitud considerando la influencia que tiene esta variable en el clima. Para cada pixel del mapa analizado se obtiene un factor de corrección de la temperatura, que considera un promedio ponderado de su distancia, horizontal y vertical, a estaciones cercanas. El factor de corrección se aplica a las series históricas y simuladas (explicadas en más detalle en la Sección 4), para considerar el efecto también en los valores generados estocásticamente. Los mapas de temperatura media, máxima y mínima de promedios multianuales, sin la corrección y con la corrección por elevación, se presentan en la Figura 3-15 para Antioquia y en la Figura 3-16 para Tolima. Este ajuste permite obtener registros de temperatura de mayor calidad.

Estos mapas son equivalentes a los presentados en la Figura 2-5, que presenta el promedio multianual de temperatura media estimada por el IDEAM. Su similitud indica que en la dimensión espacial el dataset de la Universidad de Princeton con la corrección de valores por elevación también representa la temperatura media de cada departamento. La comparación de los mapas para los dos departamentos en estudio se presenta en la Figura 3-8.

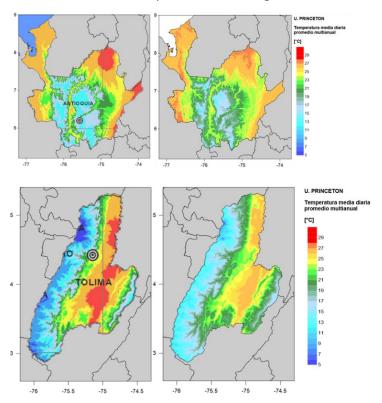


Figura 3-14. Comparación entre mapa de IDEAM (izquierda) y Universidad de Princeton (derecha) de la temperatura media anual, promedio para el rango 1981-2010



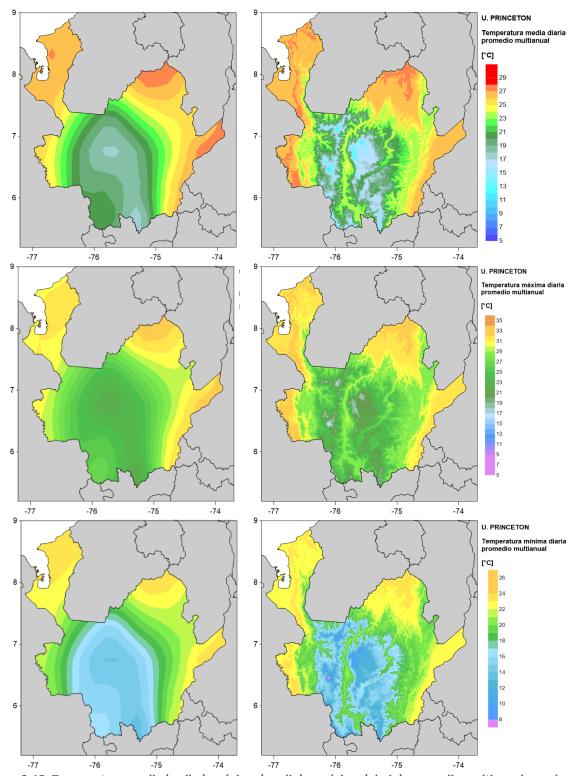


Figura 3-15. Temperatura media (arriba), máxima (medio), y mínima (abajo) promedio multianual para los años 1981-2010, sin corrección por elevación (izquierda) y con corrección por elevación del terreno (derecha) en Antioquia. (Fuente: Elaboración propia a partir de registros de Sheffield et al., 2006)



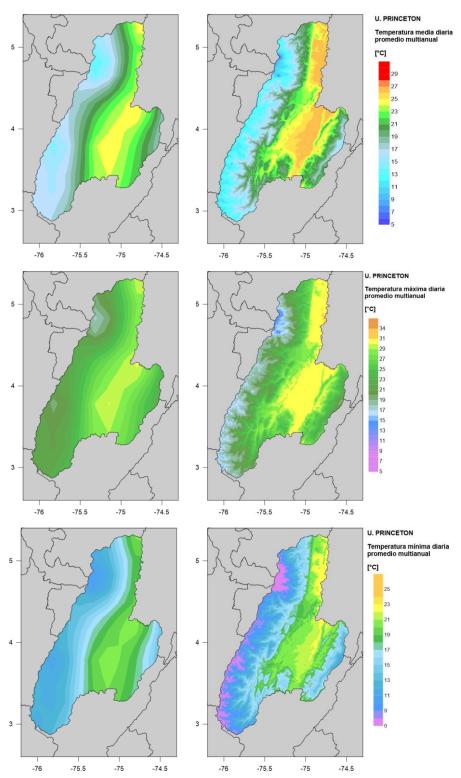


Figura 3-16. Temperatura media (arriba), máxima (medio), y mínima (abajo) promedio multianual para los años 1981-2010, sin corrección por elevación (izquierda) y con corrección por elevación del terreno (derecha) en Tolima. (Fuente: Elaboración propia a partir de registros de Sheffield et al., 2006)



#### 3.3 Otras variables climáticas

A continuación se presenta un resumen de los registros disponibles en el dataset de la Universidad de Princeton de las variables que se requieren para calcular la evapotranspiración potencial. En el Anexo A. 1 se detalla la metodología de cálculo utilizando la ecuación de Penmann-Monteith.

# 3.3.1 Radiación de onda corta y onda larga

En la Figura 3-17 y Figura 3-18 se muestra un resumen de la información de radiación obtenida de la base de datos de la Universidad de Princeton. Se muestra el mapa de distribución espacial de las variables para la media multianual y a la derecha se ve la variación en el tiempo para cada estación virtual dentro del departamento, dividida en grupos de 10 días o decadales.

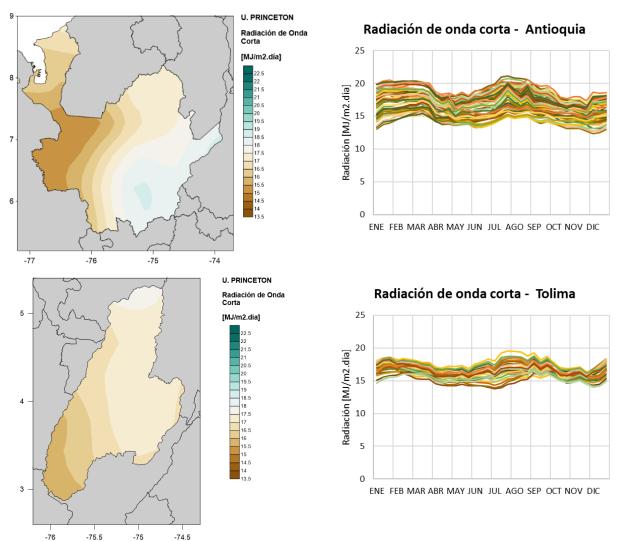


Figura 3-17. Mapa de radiación entrante de onda corta media anual (izquierda) y variación de la media decadal (derecha) para Antioquia (arriba) y Tolima (abajo).



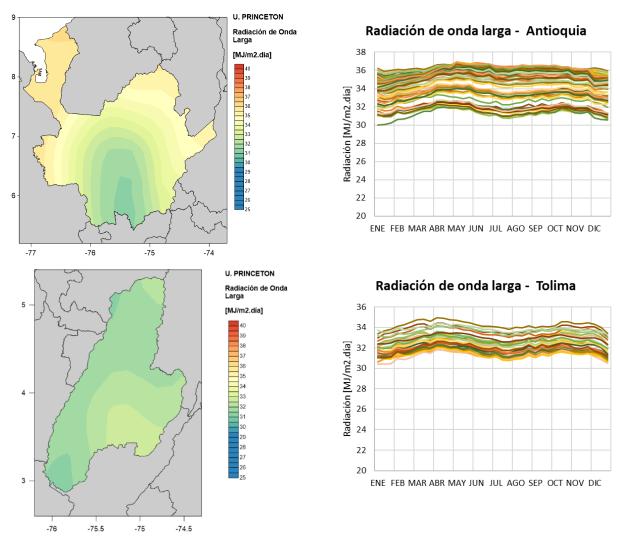


Figura 3-18. Mapa de radiación entrante de onda larga media anual (izquierda) y variación de la media decadal (derecha) para Antioquia (arriba) y Tolima (abajo).

# 3.3.2 Presión atmosférica

En la Figura 3-19 se muestra el mapa de distribución espacial de la media multianual de la presión atmosférica y a la derecha se ve la variación en el tiempo para cada estación virtual dentro del departamento, dividida en grupos de 10 días o decadales, de la misma variable. La presión atmosférica varia con la elevación de la superficie, por esta razón los valores medios de presión atmosférica son menores en las zonas de mayor elevación y mayores en los valles, por ejemplo en el valle del Magdalena en Tolima. La presión atmosférica no tiene variación importante durante las estaciones del año, como se ve en la gráfica de la derecha que presenta el valor de presión atmosférica por decadal para todas las estaciones consideradas en el análisis.



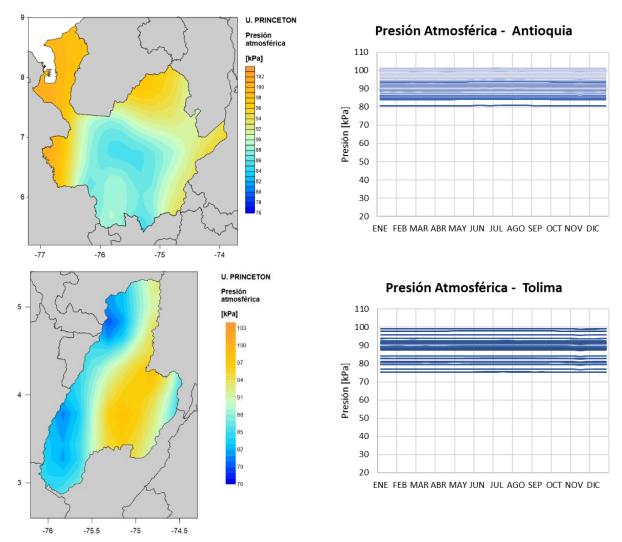


Figura 3-19. Mapa de presión atmosférica media anual (izquierda) y variación de la media decadal (derecha) para Antioquia (arriba) y Tolima (abajo).

# 3.3.3 Humedad específica

En la Figura 3-20 se muestra el mapa de distribución espacial de la media multianual de humedad específica y a la derecha se ve la variación en el tiempo para todas las estaciones virtuales dentro de cada departamento, dividida en grupos de 10 días o decadales, de la misma variable. La humedad específica relaciona la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco, en este caso se presenta gramos de vapor de agua con relación a gramos de aire seco.



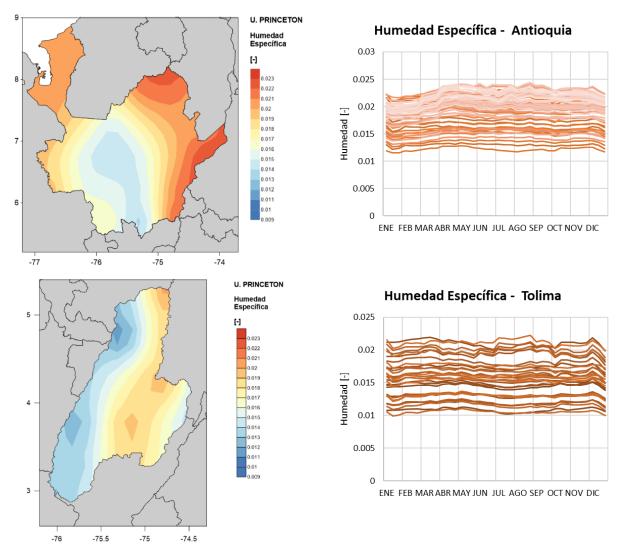


Figura 3-20. Mapa de humedad específica media anual (izquierda) y variación de la media decadal (derecha) para Antioquia (arriba) y Tolima (abajo).

La ecuación de Penmann-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración de referencia incluye el valor de humedad relativa, que no es el mismo que la humedad específica que reporta la base de datos consultada. La humedad relativa es la cantidad de humedad que posee una masa de aire con relación a la humedad máxima que podría contener sin que se produzca condensación. Entonces, para calcular la humedad relativa se debe tener en cuenta las condiciones de temperatura y presión atmosférica, que definen qué tanta humedad puede contener el aire. En el Anexo A. 1 se explica en detalle cómo se hace este cálculo.

### 3.3.4 Velocidad del viento

En la Figura 3-21 se muestra el mapa de distribución espacial de la media multianual de la velocidad del viento y a la derecha se ve la variación en el tiempo para cada estación virtual dentro del departamento, dividida en grupos de 10 días o decadales, a partir de la información del



dataset de la Universidad de Princeton. Esta velocidad del viento es medida a 2 m de la superficie. En el mapa se puede observar como los valores de velocidad de viento son mayores en las zonas costeras de Antioquia y en el límite con Choco, y muy poca variación en el resto del departamento y en Tolima.

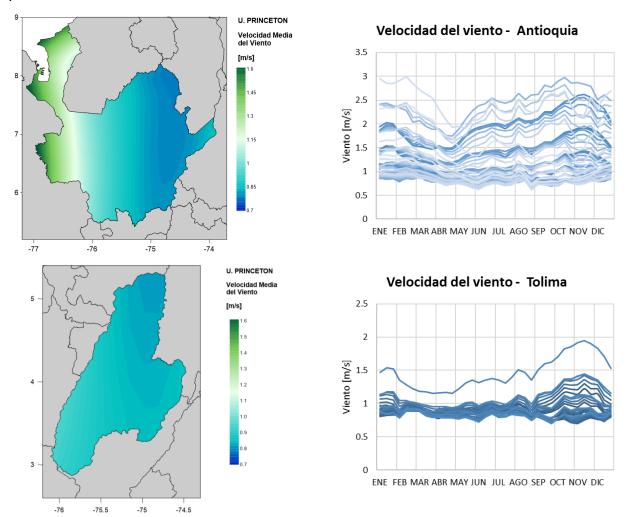


Figura 3-21. Mapa de velocidad del viento media anual (izquierda) y variación de la media decadal (derecha) para Antioquia (arriba) y Tolima (abajo).

### 3.4 Base de datos actualizada del clima para Antioquia y Tolima

Anexo a este documento se entregan los archivos digitales, en formato \*.csv, de los registros históricos de precipitación, temperatura (media, mínima y máxima), y las variables climáticas necesarias para calcular la evapotrasnpiración potencial. Estos registros se entregan para las estaciones virtuales que están dentro de los departamentos en estudio. La lista de coordenadas de estas estaciones también se incluye dentro de los archivos digitales entregados.



# 4 Generación estocástica de series climáticas para la evaluación del riesgo

# 4.1 Metodología de generación estocástica de series climáticas

La metodología propuesta utiliza un generador de clima sintético a partir de distribuciones paramétricas de probabilidad para definir conjuntos de datos climáticos históricos y estimar la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de precipitación o temperatura, incluso fuera del rango de observaciones históricas. La metodología toma cada día del año hidrológico en un análisis separado, y encuentra la distribución de probabilidad que se ajusta mejor a los registros históricos. Posteriormente, se generan números aleatorios para la precipitación y la temperatura diaria para un determinado número de años de simulación, usando los parámetros de las distribuciones seleccionadas. Las series sintéticas de clima son luego utilizadas para generar mapas de amenaza integrada para diferentes periodos de retorno para toda el área de análisis. El esquema que describe el procedimiento del generador sintético de clima se presenta en la Figura 4-1.

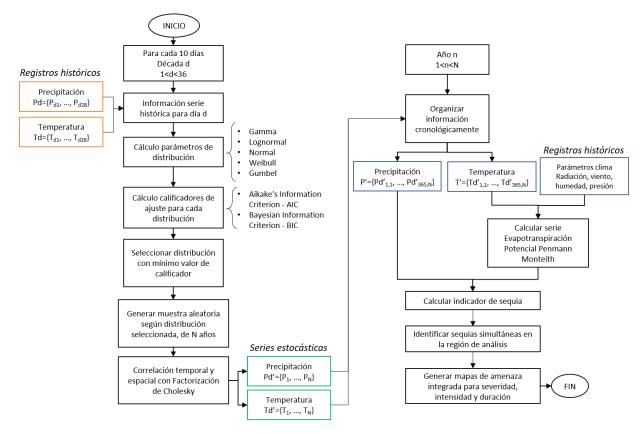


Figura 4-1. Esquema de generación de eventos estocásticos a partir de series sintéticas de variables climáticas (Fuente: Elaboración propia)

El primer paso es seleccionar las funciones de distribución de probabilidad que pueden ser aplicadas a la modelación de cada variable. Se consideran distribuciones normalmente empleadas en ciencias atmosféricas como son Gamma, Lognormal, Normal, Weibull o Gumbel, entre otras.



Posteriormente, para cada día del año, los parámetros de las distribuciones seleccionadas se estiman mediante el método de los momentos o de máxima verosimilitud.

El ajuste de las distribuciones de probabilidad se evalúa usando métodos cualitativos y cuantitativos. Los métodos cualitativos incluyen herramientas gráficas para discernir subjetivamente la bondad del ajuste. Se utiliza la superposición de la distribución paramétrica ajustada y el histograma de datos, gráficos cuantil-cuantil, gráficos de distribución acumulativa empírica y teórica (CDF), y gráficos de probabilidad-probabilidad o comparaciones de probabilidad acumulativa. Un ejemplo de estos gráficos se muestra en la Figura 4-2.

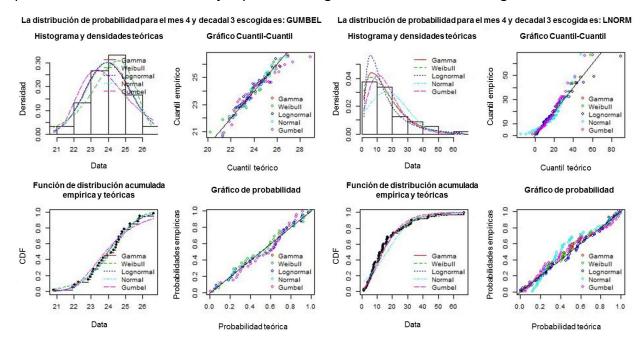


Figura 4-2. Ejemplo de métodos cualitaticos para selección de distribución de probabilidad con mejor ajuste a los datos registrados (Fuente: Elaboración propia).

La selección cualitativa se realiza con el Criterio de Información de Akaike (AIC, Akaike 1974) o el Criterio Bayesiano de Información (BIC, Schwarz 1978), que miden la calidad relativa de los modelos de distribución para un conjunto dado de datos. Está claro que los criterios AIC y BIC no dan ninguna indicación sobre la calidad del modelo, sino que es una comparación entre la bondad de ajuste de cada modelo y su complejidad en términos de un valor de penalización que aumenta con el número creciente de parámetros ajustados (Banimahd & Khalili, 2013). Numerosas alternativas de distribuciones de probabilidad se ponen a prueba para cada día del año hidrológico y cada variable climática.

Luego de definir la distribución de probabilidad más apropiada para la precipitación y la temperatura (media, máxima y mínima), para cada uno de los 365 días del año, se generan números aleatorios para un determinado número de años de simulación (del orden de 1,000 años o más). Así, se producen series aleatorias de datos climáticos para cada una de las estaciones en el área de estudio. En seguida, con el fin de incluir la correlación existente entre valores de



precipitación y temperatura en periodos de tiempo sucesivos, se calcula la matriz de autocorrelación para cada una de las series aleatorias generadas. La autocorrelación temporal indica la correlación de una variable con sus valores pasados y futuros (Wilks, 2006). Además, se incluyen los efectos de la correlación espacial, que representan la aparición de datos simultáneos en múltiples estaciones del área de estudio, utilizando la matriz de autocorrelación espacial entre valores de las diferentes estaciones de registro. Las series de números aleatorios correlacionados son más suaves, ya que los valores adyacentes (en escalas temporales y espaciales) tienden a ser más parecidos que en series independientes. De esta manera, se evitan cambios abruptos en los valores de precipitación y temperatura.

El esquema que describe el generador sintético de clima y sus aplicaciones para los casos particulares de sequía e inundación se presenta en la Figura 4-1.

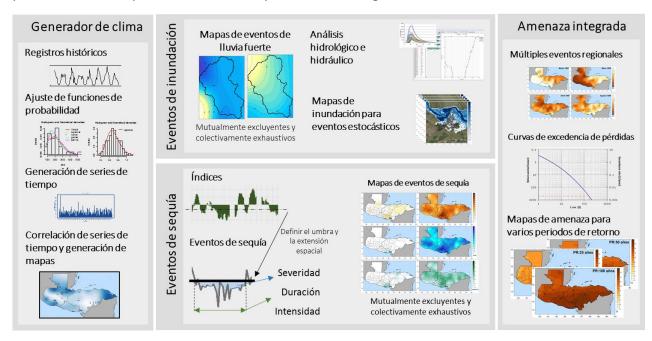
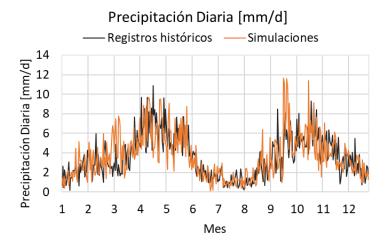


Figura 4-3. Esquema de generación de eventos estocásticos a partir de series sintéticas de variables climáticas (Fuente: Elaboración propia)

### 4.2 Generación de series climáticas para Antioquia y Tolima

En la Figura 4-4 se muestra el ajuste del promedio diario multianual de las series históricas del periodo 1981-2010 y de la serie sintética simulada aleatoriamente para 1,000 años para un punto en Tolima. Se puede ver cómo la metodología propuesta resulta en series sintéticas con un ajuste preciso a los datos históricos, lo que indica que la serie aleatoria conserva adecuadamente las características del clima de la zona. Estos resultados son muy precisos porque las series de números aleatorios correlacionados son estadísticamente correspondientes a las series históricas y preservan estadísticos de segundo orden (correlación espacial) al hacerlo de forma forzada sobre los registros históricos. De esta manera, se asegura que las simulaciones mantengan los estadísticos de las series históricas.





#### Temperatura Media Diaria



Figura 4-4. Promedio diario multianual de precipitación (arriba) y de temperatura media (abajo) para serie histórica (1981-2010) y serie sintética (1000 años de simulación).

Una de las ventajas de la metodología de generación estocástica de series climáticas es la obtención de valores atípicos extremos, que hacen referencia a valores de precipitación por encima de los máximos de los registros históricos, y valores de temperatura por fuera del rango medio registrado en estaciones. Esto quiere decir que las series modeladas incluyen valores de precipitación y temperatura que no se han presentado, pero pueden ocurrir con una baja probabilidad, en el futuro.

Los diagramas de cajas de la Figura 4-5 muestran los valores atípicos para el mismo punto de análisis en Tolima. En este ejemplo, la máxima precipitación anual registrada en el periodo 1981-2010 fue 1,600 mm/año; sólo 53 de 1,000 años simulados superan este valor alcanzando un máximo de 1,850 mm/año. De otro lado, la precipitación anual mínima del periodo 1981-2010 fue 925 mm/año y el valor mínimo de las simulaciones es de 880 mm/año. En el caso de la temperatura, los resultados de la simulación consideran temperaturas entre 22.3°C y 30.3°C mientras que los registros históricos se encuentran en un rango entre 23.1°C y 29.2°C.



Esto refleja que los valores extremos se tienen en cuenta en el análisis aun cuando probabilidad de ocurrencia es muy baja y justifica la condición de que los eventos de amenaza derivados de series estocásticas sean colectivamente exhaustivos.

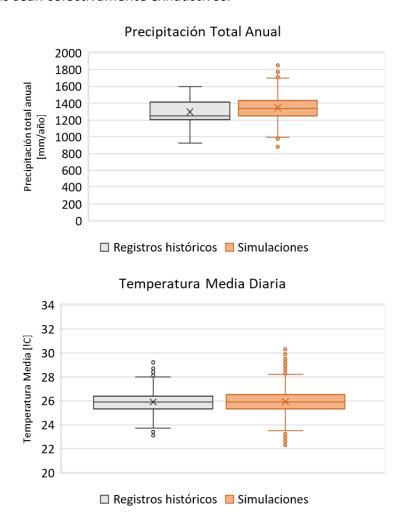
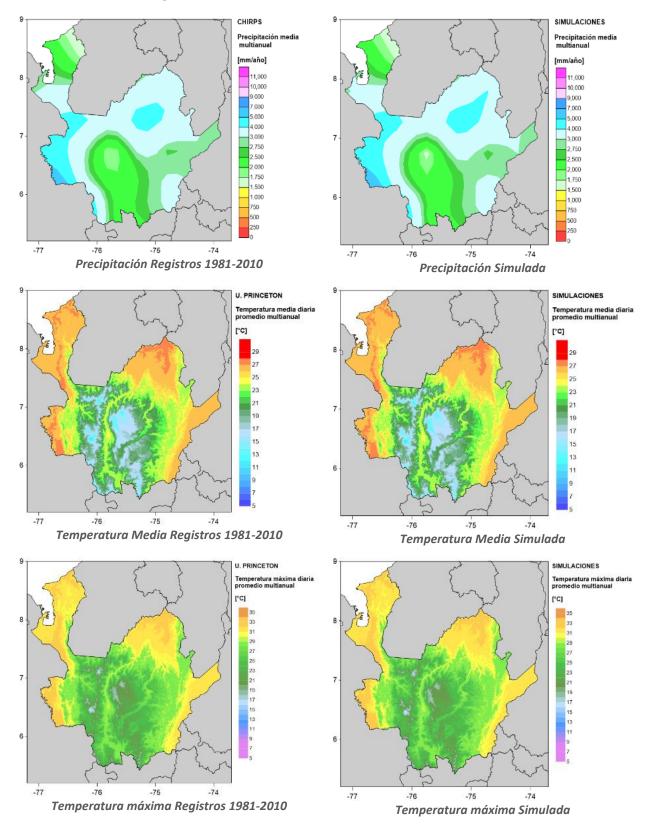


Figura 4-5. Diagramas de caja para promedio anual de precipitación (arriba) y de temperatura media (abajo) para serie histórica (1981-2010) y serie sintética (1000 años de simulación).

En términos más generales, los resultados para todo el departamento en escala espacial de la simulación de series de precipitación y temperatura se muestran en la Figura 4-6 para Antioquia y en la Figura 4-7 para Tolima. Estos mapas muestran los valores medios multianuales para la precipitación anual y temperatura media, mínima y máxima, tanto para la serie de registros históricos como simulados. La similitud entre los mapas confirma que en la dimensión espacial se mantiene la correlación entre las series.







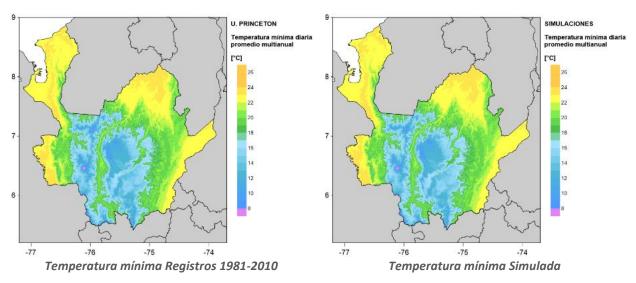
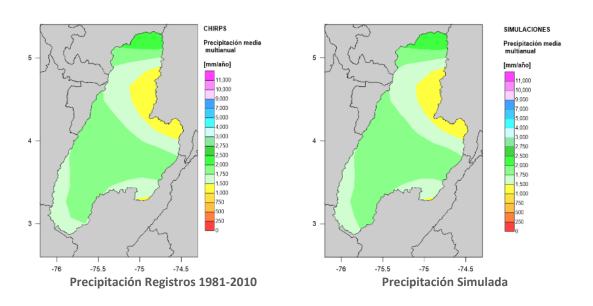


Figura 4-6. Mapas de valores medios multianuales para precipitación, temperatura media, máxima y mínima de registros históricos (izquierda) y series modeladas (derecha).





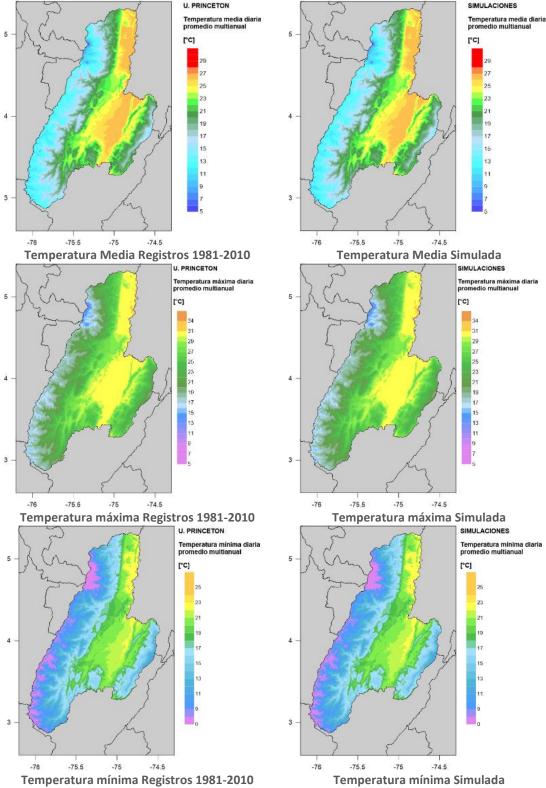


Figura 4-7. Mapas de valores medios multianuales para precipitación, temperatura media, máxima y mínima de registros históricos (izquierda) y series modeladas (derecha).



# 5 Incorporación del impacto del cambio climático en la evaluación del riesgo

De acuerdo con el Reporte AR5 del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): "el calentamiento del sistema climático es inequívoco, y desde 1950, muchos de los cambios observados son sin precedentes sobre décadas y hasta milenios. La atmósfera y océano se han calentado, las cantidades de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar ha aumentado, y la concentración de gases de efecto invernadero ha aumentado" (IPCC, 2013). Debido a esto es importante considerar los efectos de este cambio climático en la evaluación del riesgo por eventos extremos climáticos.

Con este fin, se analizaron los escenarios de cambio climático definidos por el IDEAM (Ruíz Murcia et al., 2015) para Colombia y por lo menos 41 modelos circulación global (Ver lista en Anexo A. 2.1) definidos en el informe AR5 del IPCC. Las proyecciones de los modelos del IPCC también consideran los cuatro diferentes escenarios de forcings antropogénicos (RCP o Representative Concentration Pathways).

Para considerar los RCP dentro del análisis del impacto del cambio climático en la evaluación del riesgo, se seleccionó un modelo de circulación global que minimiza la diferencia entre la media de los registros históricos en el periodo 1981-2010 y la predicción de cada modelo para el mismo periodo histórico, tanto para precipitación como temperatura. La metodología para la selección del modelo se presenta en el Anexo A. 2.

Al aplicar esta metodología, el modelo de circulación global HadGEM2-AO (Hadley Centre Global Environment Model version 2<sup>4</sup>) resultó ser el más adecuado para las condiciones de Colombia, ya que, minimiza las diferencias entre los registros históricos y las predicciones (es decir, en el mayor número de estaciones o puntos de la malla de análisis) en la mayor extensión del territorio. Este modelo considera los componentes de troposfera, superficie terrestre e hidrología, aerosoles, océano y hielo marino. HadGEM2-AO fue desarrollado por el *Met Office Hadley Centre* (MOHC) del Reino Unido. Dentro de la colección de modelos de circulación global del AR5 (IPCC), el modelo HadGEM2-AO corrida 1 (Run 1) incluye 4 escenarios de emisión, RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.

En Figura 5-1 y Figura 5-2 se muestran las proyecciones de cambio en precipitación y temperatura media en la ubicación del punto en Tolima. Esta gráfica incluye las proyecciones de la combinación de 41 modelos de circulación global, evaluados para cuatro RCP definidos en el AR5 del IPCC en gris, el modelo seleccionado y sus 4 escenarios de RCP en anaranjado y la proyección del IDEAM para Tolima en verde.

Debido a que existen múltiples predicciones, el rango de resultados es muy amplio. Para el ejemplo, la variación en temperatura para el periodo más lejano (2070-2099) varía entre 0°C y 6°C. En el caso de la precipitación, la variación en este mismo periodo esta entre -35% y +22%.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Para más información, consultar la página web https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadgem2 o el artículo https://gmd.copernicus.org/articles/4/1051/2011/gmd-4-1051-2011.pdf



Esta situación hace que no sea fácil la selección de un modelo para determinar el cambio esperado en el clima en esta ubicación.

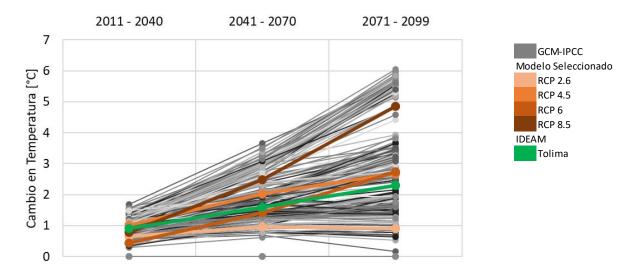


Figura 5-1. Distribución de proyecciones de cambio de temperatura según múltiples modelos de circulación global para estación en Tolima

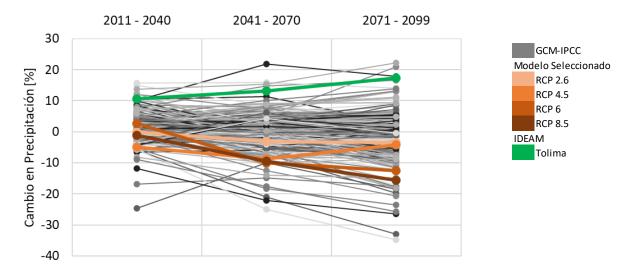


Figura 5-2. Distribución de proyecciones de cambio de precipitación según múltiples modelos de circulación global para estación en Tolima

Este análisis permite concluir que los modelos de circulación global tienen una alta dispersión, lo que indica que las proyecciones para un mismo punto tienen un amplio rango de valores esperados. No hay un único modelo que se ajuste de forma precisa a los registros históricos para un punto o un área de análisis. No se recomienda utilizar el promedio de los resultados de los modelos de circulación global o valores máximos o mínimos, porque pueden subestimar o sobre estimar el clima histórico y aumentar la incertidumbre con las proyecciones de variabilidad



climática en el futuro. Entonces, se recomienda evaluar el efecto que tienen los diferentes escenarios, RCP, de cada modelo de circulación global, lo que permite tener un rango de posibles condiciones que puedan ocurrir en el futuro considerando la incertidumbre que existe en el efecto de las medidas de mitigación que se consideran actualmente.

El modelo de amenaza que se evalua en este estudio considera los diferentes escenarios de RCP para el modelo HadGEM2-AO y las proyecciones de hechas por el IDEAM, con el objetivo de considerar múltiples escenarios futuros y cuál sería su efecto en la estimación del riesgo por fenómenos hidrometeorológicos para el maíz blanco. La metodología que se aplica considera que los cambios esperados en temperatura media se aplican de la misma forma a las series de temperatura máxima y temperatura mínima, por lo que se aplican estos mismos valores de incremento a las series sintéticas calculadas en pasos anteriores.

## 5.1 Proyecciones del modelo HADGEM2-AO en Colombia, Antioquia y Tolima

Se generaron mapas de parámetros climáticos con el fin de mostrar los cambios que implica incorporar las predicciones de un modelo de circulación global. Estos mapas se generaron para los escenarios de RCP incluidos en el modelo (RCP 2.6, 4.5, 6, 8.5, en filas) y para tres décadas de proyección (2040s, 2070s, 2099, en columnas). También se generaron mapas que muestran la variación porcentual (para precipitación) y absoluta en grados centígrados (para la temperatura). Esto permite ver cómo el modelo de circulación global distribuye las proyecciones del clima en Colombia (Figura 5-3 y Figura 5-6), Antioquia (Figura 5-4 y Figura 5-7) y Tolima (Figura 5-5 y Figura 5-8).

Para el caso de Colombia, las predicciones del cambio climático indican, en términos porcentuales, una disminución de la precipitación en promedio del 11% con valores tan altos como 51% en reducción de las lluvias y aumento en la temperatura media de 5.4°C en el escenario RCP8.5 en el largo plazo. La reducción de la precipitación se presenta en mayor medida hacia el noreste del país, mientras que el aumento de temperatura es mayor hacia el sureste para el escenario RCP8.5.

Para Antioquia, las predicciones del cambio climático indican, en términos porcentuales, un aumento de la precipitación en promedio del 8% para el escenario RCP4.5, mientras que para el escenario RCP8.5, una reducción de las lluvias en promedio del 5% en el largo plazo. El cambio en la temperatura se predice como un aumento hasta de 4.2°C. En general, las predicciones de los RCP en la región del Urabá muestran mayor reducción de la precipitación que en las demás regiones del departamento.

Para Tolima, las predicciones del cambio climático indican, en términos porcentuales, un aumento de precipitación para todos los escenarios de RCP excepto para el escenario RCP8.5 que reporta una disminución de las lluvias hasta del 10%. El incremento de la precipitación es mayor hacia el norte del departamento. El cambio en la temperatura se muestra como un aumento hasta de 3.9°C.



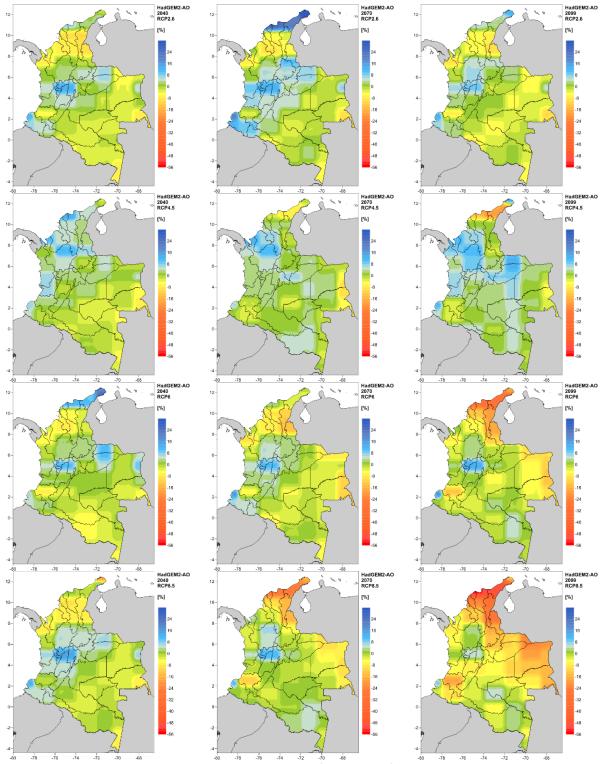


Figura 5-3. Mapas de cambio porcentual en la precipitación diaria según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global HadGEM2-AO, Colombia.



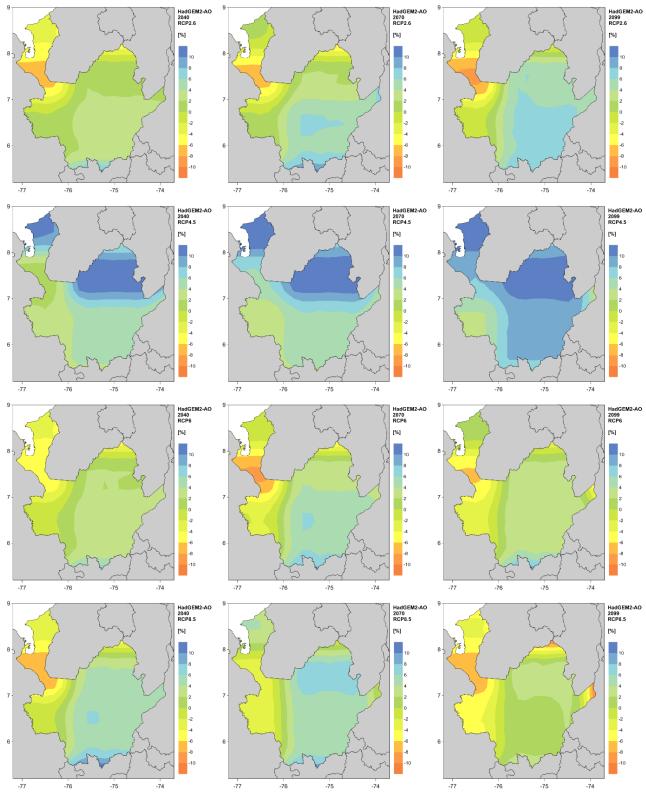


Figura 5-4. Mapas de cambio porcentual en la precipitación diaria según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global HadGEM2-AO, Antioquia



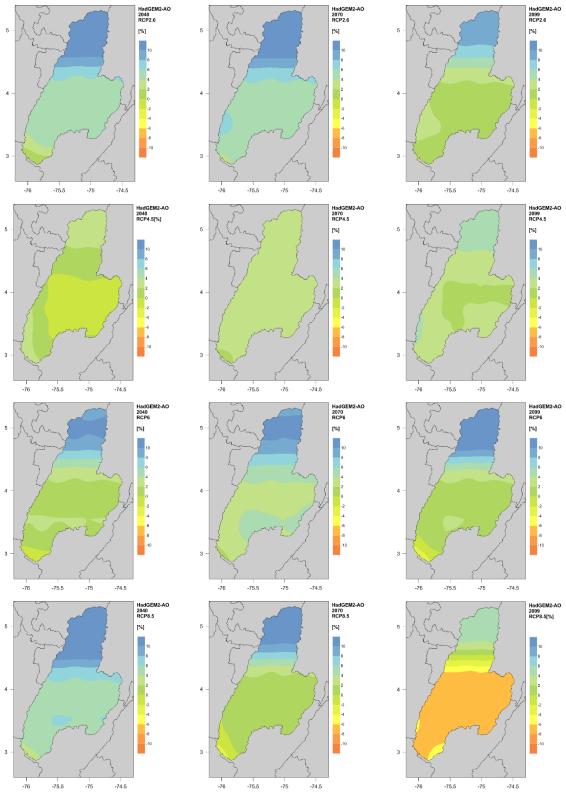


Figura 5-5. Mapas de cambio porcentual en la precipitación diaria según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global HadGEM2-AO, Tolima.



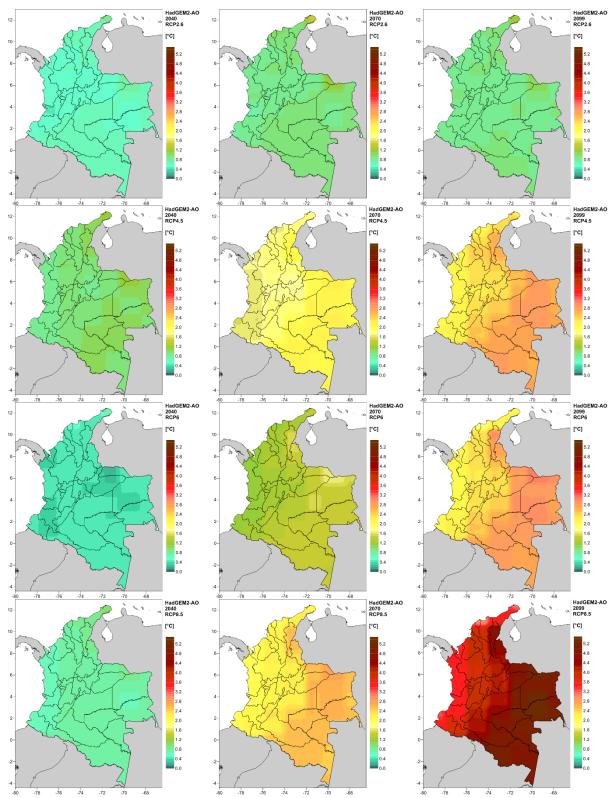


Figura 5-6. Mapas de cambio absoluto en la temperatura según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global HadGEM2-AO, Colombia.



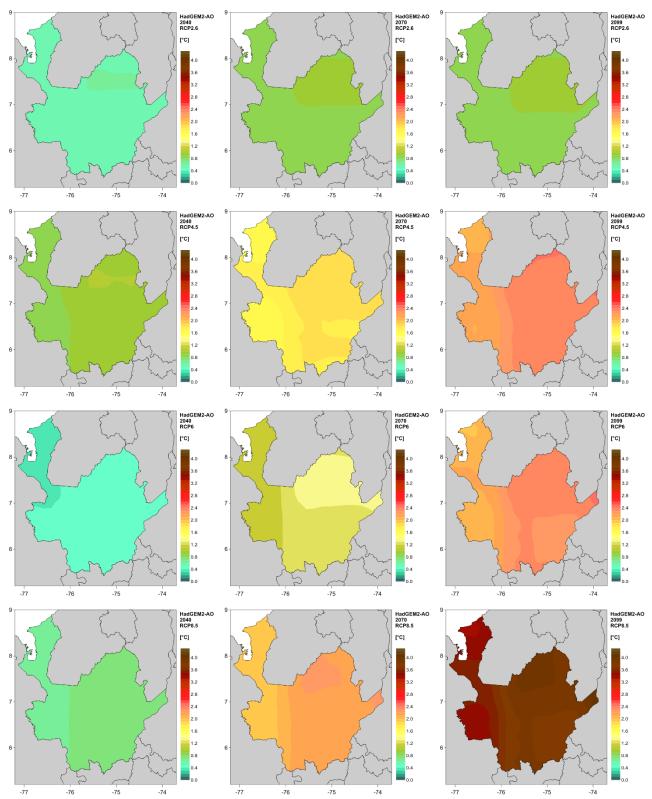


Figura 5-7. Mapas de cambio absoluto en la temperatura según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global HadGEM2-AO, Antioquia.



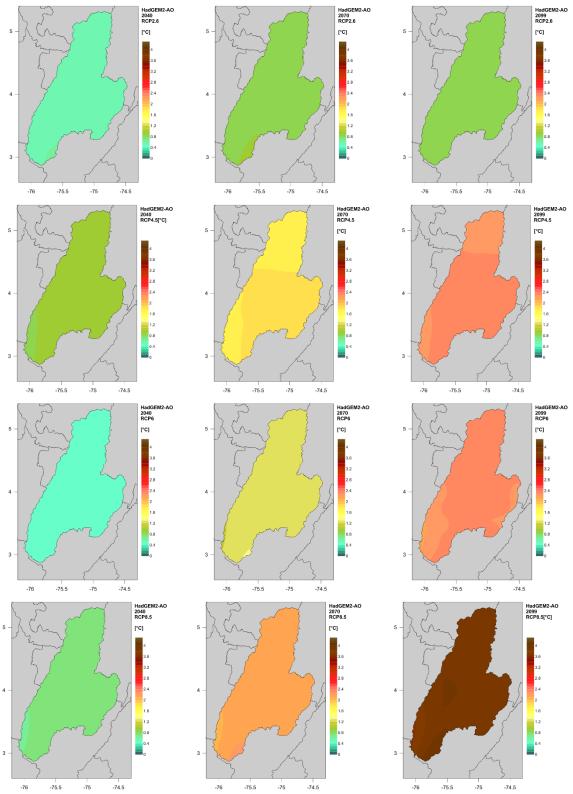


Figura 5-8. Mapas de cambio absoluto en la temperatura según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global HadGEM2-AO, Tolima.



## 6 Acrónimos

AR5 Assessment Report 5

EMC Estaciones Meteorológicas Convencionales

ha Hectárea

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

MERRA Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications

NASA National Aeronautics and Space Administration

NCEP National Centers for Environmental Prediction

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

PRER Población Rural de Escasos Recursos

RCP Representative Concentration Pathways

SAC Seguro Agrícola Catastrófico



## 7 Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO*, (56), 300. https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001
- Banimahd, S. A., & Khalili, D. (2013). Factors Influencing Markov Chains Predictability Characteristics, Utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI Drought Indices in Different Climatic Zones. *Water Resources Management*, *27*(11), 3911-3928. https://doi.org/10.1007/s11269-013-0387-z
- Daly, C, Gibson, W., Taylor, G., Johnson, G., & Pasteris, P. (2002). A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. *Climate Research*, *22*, 99-113. https://doi.org/10.3354/cr022099
- Daly, Christopher, Halbleib, M., Smith, J. I., Gibson, W. P., Doggett, M. K., Taylor, G. H., ... Pasteris, P. P. (2008). Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States. *International Journal of Climatology*, 28(15), 2031-2064. https://doi.org/10.1002/joc.1688
- FINAGRO, & Banco Mundial. (2017). Seguro Agrícola Catastrófico en Colombia. Estudio de Factibilidad. Bogotá.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, *2*, 1-21. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66
- IDEAM. (2020). Geoportal Galeria de Mapas. Recuperado de http://www.ideam.gov.co/galeria-de-mapas/-/document\_library\_display/4VnjNLZDi78B/view/98893526?\_110\_INSTANCE\_4VnjNLZDi78 B\_redirect=http%3A%2F%2Fwww.ideam.gov.co%2Fgaleria-de-mapas%3Fp\_p\_id%3D110\_INSTANCE\_4VnjNLZDi78B%26p\_p\_lifecycle%3D0%26p\_p\_state %3Dnorm
- IDEAM, & MinTIC. (2020). Catálogo Nacional de Estaciones Meteorológicas. Recuperado de Datos Abiertos website: https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu/data
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013 The Physical Science Basis* (Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed.). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324
- Ruíz Murcia, F., Gutierrez Valderrama, J. E., Dorado Delgado, J., Mendoza, J. E., Martínez Zuleta, C., Rojas Laserna, M., ... Rodríguez Salguero, M. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científica para los Tomadores de Decisiones- Enfoque Nacional Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climatico.



# https://doi.org/10.1186/1471-2156-13-58

- Sheffield, J., Goteti, G., & Wood, E. F. (2006). Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate*, 19(13), 3088-3111. https://doi.org/10.1175/JCLI3790.1
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2017). *Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el periodo 1981-2014*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Verdin, A., Rajagopalan, B., Kleiber, W., & Funk, C. (2015). A Bayesian kriging approach for blending satellite and ground precipitation observations. *Water Resources Research*, *51*(2), 908-921. https://doi.org/10.1002/2014WR015963
- World Meteorological Organization (WMO). (2015). Nuevo enfoque de dos niveles para las "normales climatológicas". Recuperado de https://public.wmo.int/es/media/news/nuevo-enfoque-de-dos-niveles-para-las-"normales-climatológicas"



#### **Anexos**

### A. 1 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

El cálculo de la serie de evapotranspiración potencial se hace siguiendo el Manual *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements* (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). En esta sección se explica de forma general el procedimiento para aplicar la metodología de Penmann-Monteith de la FAO. Para más información, consultar el estudio de la FAO publicado en el Artículo 56 de la división de Riego y Drenaje.

La evapotranspiración de referencia se entiende como el potencial de evaporación de la atmósfera; se calcula en una superficie vegetal uniforme sin restricciones hídricas. La superficie de referencia es un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23 (Allen et al., 1998); es independiente del tipo de cultivo, de su desarrollo o de su manejo. Al no tener restricciones en el contenido de agua, las características del suelo tampoco influyen en su resultado. Estas condiciones permiten comparar los resultados en diferentes localizaciones o estaciones para evaluar las condiciones evaporativas de la atmósfera ya que el ETo únicamente varía según las condiciones climáticas presentes.

#### A. 1.1 Método de Penman-Monteith

El método de Penman-Monteith permite cuantificar los procesos de evaporación (vaporización de agua desde una superficie: suelo, vegetación húmeda) y transpiración (vaporización del agua contenida en los tejidos vegetales), que ocurren simultáneamente. Los parámetros necesarios para el cálculo son el brillo solar, la temperatura, la humedad, la velocidad del viento (asociada con la evaporación), el flujo de vapor y la resistencia aerodinámica (asociada con la transpiración).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$
(Ec. A. 2-1)

en donde

 $ET_0$  es la evapotranspiración de referencia [mm/d]

 $R_n$  es la radiación neta [MJ/m<sup>2</sup>d]

G es el flujo de calor del suelo [MJ/m<sup>2</sup>d]

 $\gamma$  es la constante psicrométrica [kPa/°C]

T es la temperatura promedio diaria [°C]

 $u_2$  es la velocidad del viento (a 2m de la superficie) [m/s]

 $(e_s - e_a)$  representa el déficit de presión de vapor [kPA]

Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]



La aplicación de la metodología de Penman-Monteith implica la recopilación de información meteorológica que puede no estar disponible en todos los casos. Los parámetros meteorológicos faltantes se establecen a partir de criterio de expertos, información meteorológica general de la región y las reglas de cálculo recomendadas por la FAO (Raes, 2009). Para el caso del presente estudio, se consultó la base de datos de la Universidad de Princeton (Sheffield et al., 2006) de parámetros climáticos que incluye radiación, presión atmosférica, velocidad de viento y humedad específica con el fin de obtener datos más precisos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la región de análisis.

#### A. 1.2 Parámetros atmosféricos

#### A. 1.2.1 Presión atmosférica P

La presión atmosférica es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. La presión atmosférica se puede calcular a partir de la elevación sobre el nivel del mar, en el punto de interés.

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26}$$
 (Ec. A. 1)

donde

P es la presión atmosférica [kPa]

z es la elevación sobre el nivel del mar [m]

En caso de contar con mediciones de la presión atmosférica en estaciones de monitoreo, se utiliza es valor registrado cuidando que las unidades sean las correctas (pascales).

#### A. 1.2.2 Constante psicrométrica γ

La constante psicrométrica se define como:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.664742 x 10^{-3} P \tag{Ec. A. 2}$$

donde

γ es la constante psicrométrica [kPa/°C]

P es la presión atmosférica [kPa]

 $\lambda$  es el calor latente de vaporización, 2.45 MJ/kg a 20°C

 $c_p$  es el calor específico a presión constante, 1.013x10<sup>-3</sup> MJ/kg°C

arepsilon es el cociente del peso molecular de vapor de agua/aire seco, 0.622



### A. 1.3 Temperatura del aire

Sin información de temperatura no se puede calcular la evapotranspiración de referencia. La temperatura media diaria del aire  $(T_{media})$  se emplea en la ecuación de Penman-Monteith para calcular la pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor ( $\Delta$ ) y del impacto de la densidad media del aire (Pa). Los valores de temperatura media se obtienen de registros medidos en estaciones meteorológicas o son reportados dentro de las bases de datos globales como la publicada por la Universidad de Princeton. En el caso del cálculo de la serie de evapotranspiración para las series modeladas, que luego se utilizan en el análisis probabilista del riesgo, la serie de temperatura modelada se utiliza directamente en la ecuación de Penman-Monteith.

#### A. 1.4 Humedad del aire

### A. 1.4.1 Presión media de vapor de la saturación $e_s$

La presión media de vapor de saturación se calcula como:

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)$$
 (Ec. A. 3)

donde

 $e^{\circ}(T)$  es la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T [kPa]

T es la temperatura del aire [°C]

La presión media de vapor de saturación se calcula a partir de la temperatura máxima y mínima diaria:

$$e_s = \frac{e^{\circ}(Tmax) + e^{\circ}(Tmin)}{2}$$
 (Ec. A. 4)

donde

 $e_s$  es la presión media de saturación de vapor [kPa]

Tmax es la temperatura máxima diaria del aire [°C]

Tmin es la temperatura mínima diaria del aire [°C]

Se recomienda el cálculo de la presión media de vapor de saturación a partir de las temperaturas máximas y mínimas diarias, dado que el cálculo con la temperatura media puede llevar a subestimación del parámetro por la naturaleza no lineal de la relación presión de vaportemperatura.



# A. 1.4.2 Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor $\Delta$

La pendiente de la curva de presión de saturación de vapor para una cierta temperatura T se define como:

$$\Delta = \frac{4098 * \left[ 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$
 (Ec. A. 5)

donde

Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

T es la temperatura media del aire [°C]

### A. 1.4.3 Presión real de vapor $e_a$

Según el manual de la FAO, la presión real de vapor se puede derivar de la temperatura del punto de rocío (Tdew), de datos psicrométricos o de datos de la humedad relativa. El método que utilizar depende de la disponibilidad de datos.

•  $e_a$  a partir de la temperatura del punto de rocío (Tdew)

$$e_a = e^{\circ}(Tdew) = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27Tdew}{Tdew + 237.3}\right)$$
 (Ec. A. 6)

•  $e_a$  a partir de la humedad máxima (RHmax) y mínima (RHmin)

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{\min})RH_{max} + e^{\circ}(T_{\max})RH_{min}}{2}$$
 (Ec. A. 7)

ullet  $e_a$  a partir de la temperatura de la humedad relativa máxima

$$e_a = e^{\circ}(T_{\text{max}})RH_{min} \tag{Ec. A. 8}$$

ullet  $e_a$  a partir de la temperatura de la humedad relativa media

Para este estudio, se hace uso de la base de datos de la Universidad de Princeton (Sheffield et al., 2006), que incluye la humedad específica media entre los parámetros que reporta.

A partir de la humedad específica, se calcula la humedad relativa:



RH = 0.263 *P shum* 
$$\left[ \exp \left( \frac{17.67(T - To)}{T - 29.65} \right) \right]^{-1}$$
 (Ec. A. 9)

donde

RH es la humedad relativa [-]

P es la presión atmosférica [Pa]

shum es la humedad específica [-]

T es la temperatura media [Kelvin]

To es la temperatura de referencia, 273.16 K

Lo que es equivalente a:

$$RH = \frac{P \ shum}{0.622 \ e_s} \tag{Ec. A. 10}$$

donde  $e_s$  es la presión media de saturación de vapor [kPa].

Una vez se tiene el valor de la humedad relativa, la presión real de vapor se calcula como:

$$e_a = e^{\circ}(T_{media})RH_{media} \tag{Ec. A. 11}$$

donde  $e_a$  es la presión real de saturación de vapor [kPa] y RH la fracción de la humedad relativa. Si el valor de RH se da en porcentaje, se debe ingresar el valor de la fracción a la ecuación anterior.

### A. 1.5 Radiación

El cálculo de la radiación neta se puede hacer a partir de parámetros como la radiación extraterrestre, la radiación solar, la radiación de cielo despejado y la radiación de onda larga, a partir de constantes y funciones previamente calibradas. También se puede hacer el cálculo a partir de mediciones de radiación registrados en estaciones especializadas o incluidos en los registros de bases de datos que incluyen información de radar. A continuación, se muestran las posibilidades para el cálculo de la radiación neta.

#### A. 1.5.1 Radiación extraterrestre

La radiación extraterrestre se calcula a partir de la latitud y el día del año, a partir de las siguientes funciones:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega_s)]$$
 (Ec. A. 12)

donde



 $R_a$  es la radiación extraterrestre [MJ/m<sup>2</sup>d]

 $G_{SC}$  es la constante solar = 0,082 MJ/m<sup>2</sup>min

 $d_r$  es la distancia relativa inversa Tierra-Sol [-](Ec. A. 13)

 $\omega_s$  es el ángulo de radiación a la puesta del sol [rad]

 $\varphi$  es la latitud [rad] (Ec. A. 15)

 $\delta$  es la declinación solar [rad] (Ec. A. 14)

La distancia relativa inversa Tierra-Sol,  $d_r$ , y la declinación solar,  $\delta$ , están dadas por:

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right)$$
 (Ec. A. 13)

$$\delta = 0.409 * sen\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right)$$
 (Ec. A. 14)

donde J es el número del día del año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol,  $\omega_s$ , se da por:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]$$
 (Ec. A. 15)

### A. 1.5.2 Duración máxima de la insolación (N)

La duración máxima de la insolación N, está dada por:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \tag{Ec. A. 16}$$

donde  $\omega_s$  es el ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol calculado con la Ecuación (Ec. A. 15). El número máximo de horas de luz o insolación se utiliza para calcular la radiación solar.

#### A. 1.5.3 Radiación solar o de onda corta

Los valores de radiación solar se pueden obtener de mediciones directas o se pueden calcular utilizando la fórmula de Angstrom, que relaciona la radiación solar extraterrestre ( $R_a$ ) con la duración de la insolación (N).

Cálculo a partir de la fórmula de Angstrom

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a \tag{Ec. A. 17}$$

donde

 $R_s$  es la radiación solar o de onda corta [MJ/m<sup>2</sup>d]



n es la duración real de la insolación [horas]

N es la duración máxima posible de la insolación [horas] (Ec. A. 19)

 $R_a$  es la radiación extraterrestre [MJ/m<sup>2</sup>d] (Ec. A. 12)

 $a_s$  es la constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados (n = 0),  $a_s = 0.25$  si no existe calibración

 $a_s+b_s$  es la fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados (n = N),  $b_s=0.50$  si no existe calibración

La radiación solar neta, que es la diferencia entre la radiación solar entrante y la reflejada se calcula como:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$$
 (Ec. A. 18)

donde  $\alpha$  es el albedo o coeficiente de reflexión del cultivo. Al calcular la evapotranspiración de referencia, el albedo para el cultivo estándar es 0.23.

### Mediciones disponibles

Para la base de datos de variables climáticas de la Universidad de Princeton, se cuenta con información diaria de mediciones de radiación solar. El parámetro que se relaciona con la radiación solar o radiación de onda corta es dswrf o downward shortwave radiation. Esta radiación es la de onda corta de entrada a la atmósfera, equivalente a  $R_s$  calculada a partir de la (Ec. A. 18). Para calcular el valor neto de radiación de onda corta se debe estimar el valor de reflexión de la onda corta, que se estima a partir del albedo:

$$R_{ns} = dswrf * (1 - \alpha)$$
 (Ec. A. 19)

donde dswrf es el valor medido de radiación de onda corta expresado en MJ/m<sup>2</sup>d.

### A. 1.5.4 Radiación neta de onda larga

La radiación neta de onda larga se puede obtener a partir de mediciones o haciendo uso de la ley de Stefan-Boltzmann, que para esta metodología es corregida para incluir el efecto de la humedad y la nubosidad en la radiación de onda larga.

A partir de la ley Stefan-Boltzmann

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] \left( 0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$
 (Ec. A. 20)

donde

 $R_{nl}$  es la radiación neta de onda larga [MJ/m<sup>2</sup>d]



σ es la constante de Stefan-Boltzmann, 4.903 x 10-9 MJ/K<sup>4</sup>m<sup>2</sup>día

 $T_{max,K}$ la temperatura máxima absoluta diaria [K]

 $T_{min.K}$ la temperatura mínima absoluta diaria [K]

 $e_a$  es la presión de vapor real [kPa],

 $R_s/R_{so}$  es la radiación relativa de onda corta (valores  $\leq$  1,0)

 $R_s$  es la radiación solar medida o calculada [MJ/m<sup>2</sup>d]

 $R_{so}$  es la radiación en un día despejado [MJ/m<sup>2</sup>d] (Ec. A. 21)

La radiación solar en un día despejado  $R_{so}$  se calcula como:

$$R_{so} = (0.75 + 2x10^{-5}z)R_a$$
 (Ec. A. 21)

donde z es la elevación de la estación o punto de interés sobre el nivel del mar [m].

### Mediciones disponibles

Para la base de datos de variables climáticas de la Universidad de Princeton, se cuenta con información diaria de mediciones de radiación solar. El parámetro que se relaciona con la radiación de onda larga es dlwrf o downward longwave radiation. Esta radiación es la de onda larga de entrada a la atmósfera. Para calcular el valor neto de radiación de onda larga  $R_{nl}$  se considera que la cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia siguiendo la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$R_{nl} = dlwrf - (\varepsilon_o \sigma T_{media,K}^4 + (1 - \varepsilon_o) * dlwrf)$$
 (Ec. A. 22)

donde

dlwrf es el valor medido de radiación de onda larga [MJ/m<sup>2</sup>d]

 $\varepsilon_0$  es la emisividad, 0.98 para vegetación

σ es la constante de Stefan-Boltzmann, 4.903 x 10-9 MJ/K<sup>4</sup>m<sup>2</sup>día

 $T_{media\,K}$ la temperatura media diaria [K]

El término  $(\varepsilon_o \sigma T_{media,K}^4 + (1 - \varepsilon_o) * dlwrf)$  expresa la radiación de onda larga reflejada a la atmósfera.

#### A. 1.5.5 Radiación neta

La radiación neta  $(R_n)$  es la diferencia entre la radiación neta de onda corta  $(R_{ns})$  y la radiación neta de onda larga  $(R_{nl})$ :



$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \tag{Ec. A. 23}$$

Los valores de radiación neta de onda corta y larga se pueden obtener a partir de funciones teóricas mediciones (Ec. A. 18) y (Ec. A. 20) o de mediciones (Ec. A. 19) y (Ec. A. 22).

#### A. 1.6 Velocidad del viento

La velocidad del viento se debe incluir en el cálculo de la evapotranspiración, y se expresa como el promedio de la variable en un día. Las mediciones en estaciones deben establecer a qué altura se hacen, ya que la velocidad aumenta con la altura, debido a la fricción de la superficie. La velocidad de viento para el uso en la ecuación Penmann-Monteith debe ser a 2 m. Para mediciones para alturas diferentes se deben corregir de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$$
 (Ec. A. 24)

donde

 $u_2$  es la velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [m/s]

 $u_z$  es la velocidad del viento medida a z metros sobre la superficie [m/s]

z es la altura de medición sobre la superficie [m]

En caso de no contar con información medida de velocidad del viento, la FAO en su publicación No. 56 recomienda los siguientes valores:

Viento suave  $u_2 = 0.5 \, m/s$ 

Viento suave a moderado  $u_2 = 2 m/s$ 

Viento moderado a fuerte  $u_2 = 4 m/s$ 

Viento fuerte  $u_2 = 5.5 \ m/s$ 

# A. 1.7 Variables climáticas a partir de base de datos Universidad de Princeton

Para hacer uso de información contenida en bases de datos, se debe verificar que las variables climáticas se ajusten a los parámetros de entrada de la ecuación de Penmann-Monteith. Por ejemplo, para hacer uso de la información contenida en la base de datos de la Universidad de Princeton se hicieron los siguientes ajustes:

#### Radiación

Las unidades de radiación de la base de datos son watts por metro cuadrado [W/m²], que se transforman a mega julios por metro cuadrado [MJ/m²] para el uso de la ecuación de Penmann-Monteith. Hay que considerar que la información de la base de datos es radiación entrante de onda corta o larga, no es la radiación neta.



#### • Humedad relativa

La información contenida en la base de datos es humedad específica. Se debe hacer el ajuste, siguiendo la (Ec. A. 9) o la (Ec. A. 10) para obtener el valor de humedad relativa.

No se hicieron ajustes para la velocidad del viento o la presión atmosférica.

El procedimiento que se siguió para calcular la evapotranspiración, a partir de la información histórica de variables climáticas diferentes a temperatura, consideró la variación en el tiempo de estas variables. Es decir, para cada punto donde hay información entre los años 1981 y 2010, se calculó la media multianual del parámetro en grupos de 10 días o decadales. Con esto, se obtienen 36 valores medios en el año que consideran la estacionalidad de cada variable. Por ejemplo, en época de verano el aire caliente tiende a almacenar mayor cantidad de vapor de agua que época de invierno. El cálculo del valor de la evapotranspiración de referencia diaria toma los valores del respectivo decadal del día en que se está haciendo el cálculo.

Las medias decadales (o de grupos de 10 días consecutivos) de los parámetros climáticos diferentes a la temperatura media se utilizan tanto para el cálculo de la serie de evapotranspiración histórica como la serie simulada. No se hace una modelación o simulación estocástica de estas variables (radiación, humedad, velocidad del viento o presión atmosférica) porque se requiere de modelos meteorológicos complejos que consideren interacciones físicas que sobrepasan el alcance de este proyecto.

### A. 1.8 Evapotranspiración de referencia

Luego de calcular los parámetros climáticos necesarios para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, a partir de funciones teóricas o registros medidos en sitio, se aplica la ecuación de Penmann-Monteith que se presenta a continuación:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)}$$
 (Ec. A. 25)

donde

 $ET_0$  es la evapotranspiración de referencia [mm/d]

 $R_n$  es la radiación neta [MJ/m<sup>2</sup>d] (Ec. A. 23)

G es el flujo de calor del suelo, para periodos cortos (diario) su valor es muy pequeño comparado con el valor de  $R_n$  por lo que se considera G=0

 $\gamma$  es la constante psicrométrica [kPa/°C] (Ec. A. 2)

T es la temperatura promedio diaria [°C]

 $u_2$  es la velocidad del viento (a 2m de la superficie) [m/s]



 $(e_{\scriptscriptstyle S}-e_{a})$  representa el déficit de presión de vapor [kPa] (Ec. A. 4) y (Ec. A. 11)

 $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C] (Ec. A. 5)

El término 0.408 convierte la radiación neta de MJ/m $^2$ d al valor equivalente de evaporación en mm/día.



# A. 2 Metodología para seleccionar Modelo de Circulación Global

Dada la dispersión de los modelos de circulación global, se debe seleccionar el modelo que mejor se ajuste a la línea base de clima analizada, 1981-2010, para el territorio en estudio. La metodología propuesta y que se aplica en este estudio, se muestra como ejemplo en la Figura A-1 y consiste en identificar cuál es el modelo cuyos resultados de calibración en la historia (línea azul) mejor se ajustan a las condiciones históricas medidas en la zona (línea roja). Lo que se busca es definir el modelo que mejor replica las condiciones pasadas para disminuir la incertidumbre de las proyecciones al futuro.



Figura A- 1. Ejemplo de series históricas y proyecciones del GCM a calibrar.

Para realizar este proceso de validación se toman los valores de temperatura y precipitación correspondientes al periodo de tiempo base (1981-2010) dados por cada uno de los modelos, y se comparan con los valores de la base de datos climática (de CHIRPS y de la Universidad de Princeton) que se aplica en el modelo de amenaza. En este caso, se debe seleccionar el modelo que minimice, en la mayor extensión del territorio, las diferencias entre los registros históricos y las predicciones (es decir, en el mayor número de estaciones o puntos de la malla de análisis).

El esquema de la metodología se presenta en la Figura A- 2 y se aplica para cada estación virtual. Primero se deben calcular las diferencias de las medias diarias mensuales para cada una de las variables (precipitación y temperatura), que es el valor que se quiere minimizar para todos los puntos de la malla de estaciones virtuales. Luego se evalua la dispersión de las diferencias, por estación por mes, y se seleccional el GCM que minimice las diferencias en la mayor cantidad de estaciones y en el mayor número de meses.



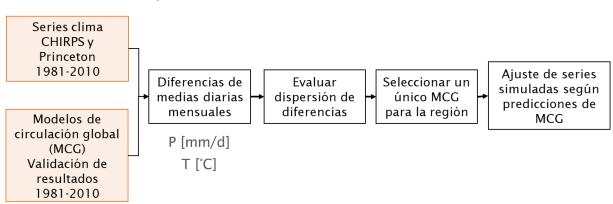


Figura A-2. Esquema de la metodología de selección de GCM

La Figura A- 3 muestra, de forma gráfica, la dispersión de las diferencias de precipitación (eje yvertical) y temperatura (eje x-horizontal) para el mes de abril de una estación virtual. Los puntos de color azul indican la diferencia de cada uno de los modelos, con sus respectivos RCP y múltiples modelaciones; en total hay 311 puntos azules en la gráfica. Las líneas punteadas en las gráficas indican el percentil 25, 50 y 75 de la serie de las diferencias. Estos límites permiten medir la dispersión de los datos y se usan como valores de referencia para seleccionar modelos que se encuentren dentro de un percentil definido por el modelador. Los puntos que se ubican por fuera del tercer anillo (percentil 75) y muy alejados del punto de origen, se pueden considerar como puntos extremos.

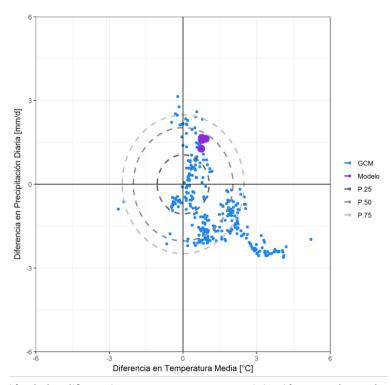


Figura A- 3. Dispersión de las diferencias en temperatura y precipitación para el mes de abril en el punto 50



Considerando que el origen de los ejes de estas gráficas (punto 0,0) indica que no hay diferencia entre los registros históricos y los resultados del modelo de circulación global, se tiene que:

- Puntos hacia la derecha del eje vertical indican que los modelos de circulación global tienen temperaturas más elevadas, es decir, condiciones de clima más calurosas. Los puntos hacia la izquierda de este eje indican condiciones de clima más frías en los modelos de circulación global.
- Puntos hacia la parte superior del eje horizontal indican que los modelos de circulación global tienen precipitaciones más altas que los registros históricos usados en la modelación. Los puntos hacia la parte inferior de este eje indican menor precipitación en los modelos de circulación global.

Los puntos en morado (más grandes) indican la ubicación de las diferencias del modelo seleccionado, aplicando criterios de selección regional (escoger un único modelo para todos los puntos en la malla de análisis). Se presenta más de un punto seleccionado, porque el análisis incluye los múltiples RCP de cada modelo. Es decir, para la evaluación de la amenaza se consideran los diferentes escenarios de emisiones, desde el RCP2.6 (que considera medidas fuertes para la reducción de emisiones) hasta RCP8.5 (que no contempla políticas de reducción de emisiones lo que produce mayores concentraciones de gases efecto invernadero en el tiempo) según la disponibilidad de información. Con esto, se pueden calcular los efectos de mitigar el cambio climático y cómo cambian las condiciones de tiempo que se pueden presentar en el futuro.

La Figura A- 4 muestra la dispersión de las diferencias en precipitación y temperatura, para todos los meses del año para la misma estación virtual de la malla de análisis. Se puede ver como algunos resultados reproducen condiciones más o menos lluviosas, o más o menos calurosas, considerando que el punto de origen de los ejes de las gráficas representa las condiciones de los registros históricos. Para meses de verano (noviembre-enero) se presentan diferencias positivas en temperatura, lo que indica que los modelos de circulación global están por encima de los registros históricos mientras que abril y octubre presentan alta dispersión en el eje vertical, lo que indica variabilidad en las diferencias en precipitación.

Esto muestra que la generación de modelos de circulación global es una tarea difícil y cómo el proceso de calibración no se ajusta a las diferentes regiones del planeta (razón por la que no existe un único modelo de cambio climático aceptado globalmente). Entonces, es difícil establecer un único modelo de circulación global que se ajuste de forma óptima a todo el territorio estudiado. Ahora bien, se puede seleccionar un modelo que cumpla con la condición de que sus predicciones se acerquen a los registros históricos en la mayor parte del territorio. Este procedimiento de selección se explica a continuación.



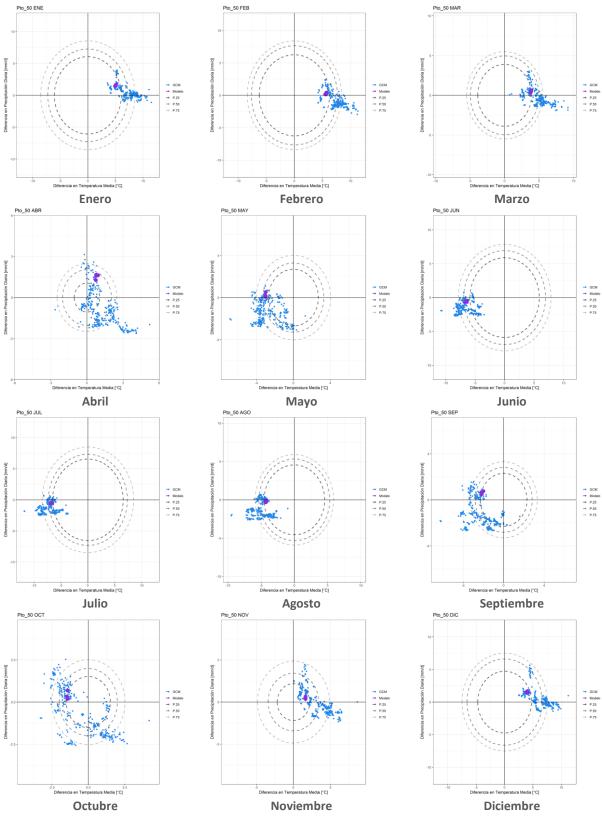


Figura A- 4. Dispersión de las diferencias en temperatura y precipitación



Luego de determinar las diferencias entre los registros históricos y las predicciones de cada modelo para la base 1981-2010, se procede a seleccionar el modelo que mejor se ajusta en el mayor número de puntos de la malla de análisis. Esto se hace para mantener la homogeneidad de las predicciones de cambio climático en la zona. La selección se hace con el criterio de minimizar la distancia entre el punto de las diferencias de precipitación y temperatura con el origen. Es decir, se selecciona el modelo que para el mayor número de meses y mayor número de puntos tenga la menor distancia (equivalente a menor diferencia) al punto de origen 0,0. La distancia de cada punto se calcula como:

$$d = \sqrt{t^2 + p^2}$$
 (Ec. 26)

Donde  $t=T_{GCM}-T_{Hist\'orica}$  y  $p=P_{GCM}-P_{Hist\'orica}$  para cada media diaria mensual de temperatura y precipitación, respectivamente. Una vez se calculan las distancias para todos los modelos de circulación global, con sus respectivos RCP y modelaciones, se calcula la media de distancias para cada mes y la media de distancias para el año.

### A. 2.1 Modelos de circulación global considerados en este estudio

Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
ACCESS 1	Australian Community Climate and Earth System Simulator	Australia	Modelo que prescribe la temperatura de la superficie terrestre y por lo tanto produce un estado promedio de un modelo que permite libremente las variaciones en temperatura.	Ackerley, D. & Dommenget, D. (2016). Atmosphere-only GCM (ACCESS1.0) simulations with prescribed land surface temperatures. Geosci. Model Dev., 9, pp. 2077-2098, doi:10.5194/gmd-9- 2077-2016, 2016.
BCC-CSM 1.1	Beijing Cliamte Center Climate System Model versión 1.1	China	Modelo en el cual el componente atmosférico (BCC_AGCM2.1), el componente oceánico (MOM4-L40), el componente terrestre (BCC_AVIM 1.0) y el componente de hielo oceánico (SIS) están completamente acoplados e interaccionan mutuamente a través de flujos de momento, energía, agua y carbono.	Wu T., Li W., Ji J., Xin X., et al. (2012). The 20th century global carbon cycle from the Beijing Climate Center Climate System Model (BCC_CSM). J. Climate
BNU-ESM	Beijing Normal University Earth System Model	China	Modelo acoplado que se compone de 5 componentes: atmósfera (CAM4), tierra (CoLM), océano (MOM4pl), hielo oceánico (CICE 4.1) y ciclo del carbono.	D. Ji1, L. Wang1, J. Feng1, Q. Wu1, H. Cheng1, Q. Zhang1, J. Yang2, W. Dong2, Y. Dai1, D. Gong2, RH. Zhang3,4,X. Wang4, J. Liu5, J. C. Moore1, D. Chen6, and M. Zhou7. (2014). Description and basic evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) version 1. Geosci. Model Dev., 7, pp. 2039-2064.
CanESM2	Second Generation Canadian Earth System Model	Canada	Modelo que acopla el modelo de circulación atmósfera-océano con un modelo de vegetación y el ciclo interactivo de carbono sobre tierra y océano.	P. Chylek1, J. Li2, M. K. Dubey1, M. Wang3, and G. Lesins4. (2011). Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2.



Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
				Atmos. Chem. Phys. Discuss., 11, pp. 22893-22907.
CCSM4	Community Climate System Model	Estados Unidos	Modelo acoplado de 4 componentes: atmósfera, océano, superficie terrestre y hielo oceánico. Es un sub-set del modelo CESM1 (Community Earth System Model) de la UCAR y es mantenido por la NCAR.	PETER R. GENT,* GOKHAN DANABASOGLU,* LEO J. DONNER, MARIKA M. HOLLAND,* ELIZABETH C. HUNKE, # STEVE R. JAYNE, @ DAVID M. LAWRENCE,* RICHARD B. NEALE,* PHILIP J. RASCH, & MARIANA VERTENSTEIN,* PATRICK H. WORLEY,** ZONG-LIANG YANG, 11 AND MINGHUA ZHANG. (2011). The Community Climate System Model Version 4. Journal of Climate, 24, pp. 4973-4991
CESM1- BGC	Community Earth System Model Versión 1 - BioGeoChemical model	Estados Unidos	Modelo que acopla un modelo terrestre biogeoquímico (que incluye la dinámica del carbono- nitrógeno) a un modelo oceánico biogeoquímico y al Co2 atmosférico.	Keith Lindsay, Gordon B. Bonan, Scott C. Doney, Forrest M. Hoffman, David M. Lawrence, Matthew C. Long, Natalie M. Mahowald, J. Keith Moore, James T. Randerson, Peter E. Thornton. (2014). Preindustrial-Control and Twentieth-Century Carbon Cycle Experiments with the Earth System Model CESM1 (BCG). Journal of CLimate, 27(24), pp. 8981-9005
CESM1- CAM5	Community Earth System Model Version 1 - Community Atmospheric Model Version 5	Estados Unidos	El CAM5 corresponde al componente atmosférico del CESM1. Esta versión permite simular los efectos radiativos de los aerosoles.	NCAR. (2012). Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5.0). NCAR Technical Note.
CMCC- CESM	Centro Euro- Mediterráneo sui Cambiamenti Climatici - Carbon Earth System Model	Italia	Modelo de circulación general entre la atmósfera y el océano de 5 componentes: océano (NEMO), atmósfera (ECHAM5), hielo oceánico (LIM2), biogeoquímica oceánica (PELAGOS) y vegetación terrestre (SILVA).	Fogli, P.G. & Iovino, D. (2014). CMCC-CESM-NEMO: toward the new CMCC Earth System Model. CMCC Research Papers, (RP0248).
CMCC- CM	Centro Euro- Mediterráneo sui Cambiamenti Climatici - Climate Model	Italia	Modelo acoplado de circulación general atmósfera-océano de 3 componentes: océano (OPA 8.2), hielo oceánico (LIM) y atmósfera (ECHAM5).	Bellucci, A., S. Gualdi, E. Scoccimarro, and A. Navarra, 2008: NAO-ocean circulation interactions in a coupled general circulation model. Climate Dyn., 31, 759-777, doi:10.1007/s00382-008- 0408-4
CMCC- CMS	Centro Euro- Mediterráneo sui Cambiamenti Climatici - Climate Model with a resolved Stratosphere	Italia	Modelo basado en el CMCC-CM con modificaciones a la estratosfera.	Cagnazzo, C., Manzini E., Fogli, P. G., Vichi, M. and Davini P. (2012). "Role of Stratospheric Dynamics in the Ozone- Carbon connec)on in the Southern Hemisphere".



Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
CNRM- CM5	Centre National de Recherches Météorologiques - Coupled Model 5	Francia	Modelo acoplado de 5 componentes: atmósfera (ARPEGE- Climate), océano (NEMO), hielo oceánico (GELATO), tierra (SURFEX) y ríos (TRIP).	Voldoire, A., E. Sanchez-Gomez, D. Salas y Mélia, B. Decharme, C. Cassou, S.Sénési, S. Valcke, I. Beau, A. Alias, M. Chevallier, M. Déqué, J. Deshayes, H. Douville, E. Fernandez, G. Madec, E. Maisonnave, MP. Moine, S. Planton, D.Saint-Martin, S. Szopa, S. Tyteca, R. Alkama, S. Belamari, A. Braun, L. Coquart, F. Chauvin. (2011). The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. Clim. Dyn., accepted, DOI:10.1007/s00382-011-1259-y
CSIRO- Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	Australia	Modelo de atmósfera-océano acoplado que incluye hielo oceánico, y un esquema suelo-cobertura vegetal.	Jeffrey, S. J., Rotstayn, L. D., Collier, M. A., Dravitzki, S. M., Hamalainen, C., Moeseneder, C., Wong, K. K., and J. I. Syktus (2013). Australia's CMIP5 submission using the CSIRO Mk3.6 model. Australian Meteorological and Oceanographic Journal, 63, pp. 1–13, http://www.bom.gov.au/amoj/docs/2013/jeffrey_hres.pdf.
FGOALS- g2	Flexible Global Ocean- Atmosphere- Land System, Gridpoint version 2	China	Modelo de 4 componentes: atmósfera (GAMIL2), océano (LICOM2), hielo oceánico (CICE4- LASG) y tierra (CLM3).	Li, L., Lin, P., Yu, Y. et al. (2013). The flexible global ocean-atmosphere-land system model, Grid-point Version 2: FGOALS-g2. Adv. Atmos. Sci., 30:(543). doi:10.1007/s00376-012-2140-6
FGOALS- s2	Flexible Global Ocean- Atmosphere- Land System, Spectral version 2	China	Modelo de 4 componentes: atmósfera (SAMIL2), océano (LICOM2), hielo oceánico (CICE4- LASG) y tierra (CLM3).	Bao, Q., Lin, P., Zhou, T. et al. (2013). The flexible global ocean-atmosphereland system model, Spectral Version 2: FGALS-s2. Adv. Atmos. Sci., 30(561). doi:10.1007/s00376-012-2113-9
FIO-ESM	First Institute of Oceanography- Earth System Model	China	Modelo climático acoplado con un modelo completo del ciclo del carbono de 5 componentes: olas superficiales oceánicas, atmósfera, océano, tierra y hielo oceánico.	Qiao, F., Song, Z., Bao, Y., Song, Y., Shu, Q., Huang, C., Zhao, W. (2013). Development and evaluation of an Earth System Model with surface gravity waves. Journal of Geophysical Research, 118(9), pp.4514-4524)
GFDL- CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Climate Model 3	Estados Unidos	Modelo acoplado de 5 componentes: atmósfera (AM3), tierra (LM2), vegetación, hielo oceánico (SIS( y océano (MOM).	Leo J. Donnera, Bruce L. Wymana, Richard S. Hemlera, Larry W. Horowitza, Yi Minga, Ming Zhaob, Jean-Christophe Golaza, Paul Ginouxa, SJ. Lina, M. Daniel Schwarzkopfa, John Austinb, Ghassan Alakac, William F. Cooked, Thomas L. Delwortha, Stuart M. Freidenreicha, C. T. Gordona, Stephen M. Griffiesa, Isaac M. Helda, William J. Hurlina, Stephen A. Kleine, Thomas R. Knutsona, Amy R. Langenhorstd, Hyun-Chul Leed, Yanluan Linb, Brian I. Magif, Sergey L. Malyshevf, P. C. D. Millyg, Vaishali Naikd, Mary J. Natha, Robert Pincush, Jeffrey J. Ploshaya, V.



Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
				Ramaswamya, Charles J. Semana, Elena Shevliakovaf, Joseph J. Sirutisa, William F. Sterna, Ronald J. Stouffera, R. John Wilsona, Michael Wintona, Andrew T. Wittenberga, and Fanrong Zenga. (2011). The Dynamical Core, Physical Parametrizations, and Basic Simulation Characteristics of the Atmospheric Component AM3 of the GFDL Global Coupled Model CM3. Journal of CLimate. DOI: http://dx.doi.org/10.1175/2011JCLI3955.1
GFDL- ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model 2G	Estados Unidos	Modelo de 4 componentes: océano (GOLD), tierra (LM3), atmósfera y hielo oceánico.	John P. Dunne*, Jasmin G. John*, Alistair J. Adcroft+, Stephen M. Griffies*, Robert W. Hallberg*, Elena Shevliakova#, Ronald J. Stouffer*, William Cooke@, Krista A. Dunne&, Matthew J. Harrison*, John P. Krasting**, Sergey L. Malyshev#, P. C. D. Milly&, Peter J. Phillipps*, Lori T. Sentman*, Bonita L. Samuels*, Michael J. Spelman@, Michael Winton*, Andrew T. Wittenberg*, and Niki Zadeh. (2012). GFDL's ESM2 Global Coupled Climate- Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. Journal of Climate. DOI: http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11- 00560.1
GFDL- ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model 2M	Estados Unidos	Modelo de 4 componentes: océano (MOM4.1), tierra (LM3), atmósfera y hielo oceánico.	John P. Dunne*, Jasmin G. John*, Alistair J. Adcroft+, Stephen M. Griffies*, Robert W. Hallberg*, Elena Shevliakova#, Ronald J. Stouffer*, William Cooke@, Krista A. Dunne&, Matthew J. Harrison*, John P. Krasting**, Sergey L. Malyshev#, P. C. D. Milly&, Peter J. Phillipps*, Lori T. Sentman*, Bonita L. Samuels*, Michael J. Spelman@, Michael Winton*, Andrew T. Wittenberg*, and Niki Zadeh. (2012). GFDL's ESM2 Global Coupled Climate- Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. Journal of Climate. DOI: http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11- 00560.1
GISS-E2	Goddard Institute for Space Studies-E2	Estados Unidos	Modelo de 4 componentes: océano, tierra, atmósfera, y hielo oceánico; con capacidad de modelar interacciones entre química atmosférica, aerosoles, y el ciclo de carbono.	Nazarenko, L., G.A. Schmidt, R.L. Miller, N. Tausnev, M. Kelley, R. Ruedy, G.L. Russell, I. Aleinov, M. Bauer, S. Bauer, R. Bleck, V. Canuto, Y. Cheng, T.L. Clune, A.D. Del Genio, G. Faluvegi, J.E. Hansen, R.J. Healy, N.Y. Kiang, D. Koch, A.A.



Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
				Lacis, A.N. LeGrande, J. Lerner, K.K. Lo, S. Menon, V. Oinas, J.P. Perlwitz, M.J. Puma, D. Rind, A. Romanou, Mki. Sato, D.T. Shindell, S. Sun, K. Tsigaridis, N. Unger, A. Voulgarakis, MS. Yao, and J. Zhang, 2015: Future climate change under RCP emission scenarios with GISS ModelE2. J. Adv. Model. Earth Syst., 7, no. 1, 244-267, doi:10.1002/2014MS000403.
HadCM3	Hadley Centre Coupled Model Version 3	Reino Unido	Modelo acoplado océano (Modelo HadOM3) -atmósfera (modelo HadAM3) usado en el tercer reporte de evaluación del IPCC.	Pope, V., M.L. Gallani, P.R. Rowntree, R.A. Stratton, 2000. The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. Clim. Dyn., 16, 123-146
HadGEM 2	Hadley Centre Global Environment Model version 2	Reino Unido	Modelo acoplado océano- atmósfera, con modelación vertical que incluye un modelo de la estratósfera, e incluye interacciones del sistema terrestre como vegetación dinámica, biología marina y química atmosférica.	Collins, W.J., N. Bellouin, M. Doutriaux-Boucher, N. Gedney, T. Hinton, C. D. Jones, S. Liddicoat, G. Martin, F. O'Connor, J. Rae, C. Senior, I. Totterdell, S. Woodward, T. Reichler, J. Kim, 2008: Evaluation of the HadGEM2 model. Met Office Hadley Centre Technical Note no. HCTN 74, http://www.metoffice.gov.uk/publications/HCTN/index.html
INMCM4	Institute for Numerical Mathematics Climate Model 4	Rusia	Modelo acoplado océano- atmósfera.	Volodin, E.M., Dianskii, N.A. & Gusev, A.V. Izv. Atmos. Ocean. Phys. (2010) 46: 414. https://doi.org/10.1134/S00014338100 4002X
IPSL- CM5	Institut Pierre Simon Laplace Climate Model	Francia	Modelo del sistema terrestre completo, con dos conjuntos de modelos físicos.	Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5, Dufresne, JL., et al., Climate Dynamics, 40, 9-10, 2123-2165, 2013, doi: 10.1007/s00382-012-1636-1
MIROC4h	Model for Interdisciplinary Research on Climate 4	Japón	Modelo acoplado océano-atmósfera de alta resolución.	Takashi T. SAKAMOTO, Yoshiki KOMURO, Teruyuki NISHIMURA, Masayoshi ISHII, Hiroaki TATEBE, Hideo SHIOGAMA, Akira HASEGAWA, Takahiro TOYODA, Masato MORI, Tatsuo SUZUKI, Yukiko IMADA, Toru NOZAWA, Kumiko TAKATA, Takashi MOCHIZUKI, Koji OGOCHI, Seita EMORI, Hiroyasu HASUMI, Masahide KIMOTO, MIROC4h—A New High-Resolution Atmosphere-Ocean Coupled General Circulation Model, Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, Released June 30, 2012, Online ISSN 2186-9057, Print ISSN 0026-1165, https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-301, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj /90/3/90_2012-301/_article/-char/en,



Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate 5	Japón	Modelo acoplado océano-atmósfera con actualizaciones en esquemas de parametrización para obtener mejores resultados que versiones anteriores del modelo.	Watanabe et. Al. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability and Climate Sensibility. December 2010Journal of Climate 23:6312-6335
MIROC- ESM	Model for Interdisciplinary Research on Climate Earth System Model	Japón	Modelo del sistema terrestre, incluye atmósfera, océano, hielo oceánico, superficie terrestre, bioquímica oceánica y terrestre y química atmosférica.	Watanabe et al. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. Geosci. Model Dev., 4, 845-872, 2011 https://doi.org/10.5194/gmd-4-845- 2011
MPI-ESM	Max Planck Institut fur Meteorologie Earth System Model	Alemania	Modelo acoplado de atmósfera (ECHAM6), océano (MPIOM), superficie terrestre (JSBACH) y bioquímica oceánica (HAMOCC).	Max Planck Institute for Meteorology Earth System Model. Journal of Advances in Modelling Earth Systems. Special Issue. 2018.
MRI- CGCM3	Meteorological Research Institute Global Climate Model 3	Japón	Modelo acoplado de módulos atmósfera-superficie, aerosoles y hielo oceánico. Es parte del modelo del sistema terrestre MRI-ESM1	Yukimoto et al. A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 - Model Description and Basic Performance. Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 90A, pp. 2364, 2012.
NorESM1 -M	Norwegian Earth Sustem Model	Noruega	Modelo basado en CCSM4, con modelos avanzados para océano y de interacción entre química- aerosoles-nubosidad-radiación en la atmosfera.	Bentsen et al. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. Geosci. Model Dev., 6, 687-720, 2013