



Contratos GGC 1113-2024 y GGC 1949-2025

Suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad Nacional de Colombia con el objeto de “Prestar servicios para apoyar el desarrollo de las actividades priorizadas de mediano y largo plazo contenidas en el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático 2050” y “Prestar Servicios de investigación Científica para la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático PIGCCme 2050 a través de la implementación del Sistema de Información Climática del MME”



Análisis de la información cartográfica de cobertura nacional con tipificación de la amenaza por cambio climático del sector minero energético

Contenido

PARTE I: Marco conceptual de la relación clima – sector minero energético (minas, hidrocarburos, energía)

PARTE II: Escenarios de cambio climático, desarrollados para el sector minero energético

PARTE III: Análisis de la amenaza por cambio climático en las dimensiones del sector energético (subsectores e infraestructura)

PARTE IV: Tipificación de la amenaza por cambio climático en las dimensiones territoriales como medio biótico, recurso hídrico, riesgo de desastres e infraestructura)]

Bogotá D.C., diciembre de 2025



Contratos GGC 1113-2024 y GGC 1949-2025

Suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad Nacional de Colombia con el objeto de “Prestar servicios para apoyar el desarrollo de las actividades priorizadas de mediano y largo plazo contenidas en el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático 2050” y “Prestar Servicios de investigación Científica para la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático PIGCCme 2050 a través de la implementación del Sistema de Información Climática del MME”



PARTE I

Marco conceptual de la relación clima – sector minero energético (minas, hidrocarburos, energía)



Contratos GGC 1113-2024 y GGC 1949-2025

Suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad Nacional de Colombia con el objeto de “Prestar servicios para apoyar el desarrollo de las actividades priorizadas de mediano y largo plazo contenidas en el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático 2050” y “Prestar Servicios de investigación Científica para la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático PIGCCme 2050 a través de la implementación del Sistema de Información Climática del MME”





Contratos GGC 1113-2024 y GGC 1949-2025

Suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad Nacional de Colombia con el objeto de “Prestar servicios para apoyar el desarrollo de las actividades priorizadas de mediano y largo plazo contenidas en el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático 2050” y “Prestar Servicios de investigación Científica para la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático PIGCCme 2050 a través de la implementación del Sistema de Información Climática del MME”



I.1 Introducción

El producto que presenta el este documento sintetiza el desarrollo alcanzado en los contratos GGC 1113-20214 y GGC 1949-2025 suscritos entre el Ministerio de Minas y Energía (MME) y la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) – (Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geografía), con los objetos *“Prestar servicios para apoyar el desarrollo de las actividades priorizadas de mediano y largo plazo contenidas en el Plan Integral de Gestión de Cambio Climático 2050”* y *“Prestar Servicios de investigación Científica para la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático PIGCCme 2050 a través de la implementación del Sistema de Información Climática del MME”*, respectivamente.

Este producto consiste en la *“Evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgos en los componentes del sector minero energético y en las dimensiones territoriales asociadas al cambio climático para fundamentar estrategias y acciones de adaptación sectorial al cambio climático”*. Como parte del mismo se encuentra el desarrollo de un marco conceptual de la relación clima – sector minero energético. El presente documento presenta aspectos de dicha relación a partir de la influencia del clima en el subsector hidrocarburos y de los impactos del cambio climático en el mismo, como aporte a la construcción del marco conceptual, utilizando como insumo los resultados obtenidos en las reuniones técnicas celebradas con actores del sector.

I.2. La influencia del clima en el subsector minero

La influencia del clima en la minería se explica por la relación diferencial entre el comportamiento espacial y estacional de las variables climatológicas (como la precipitación, temperatura y eventos extremos) y los diferentes tipos de minería, la escala de operación, los métodos de extracción utilizados y las fases de la línea de producción. De esta manera, el clima incide en diferentes aspectos de la actividad minera, desde los tiempos y costos de montaje y operación de determinada actividad, hasta la calidad ambiental en los cierres de las minas (Figura I.1).

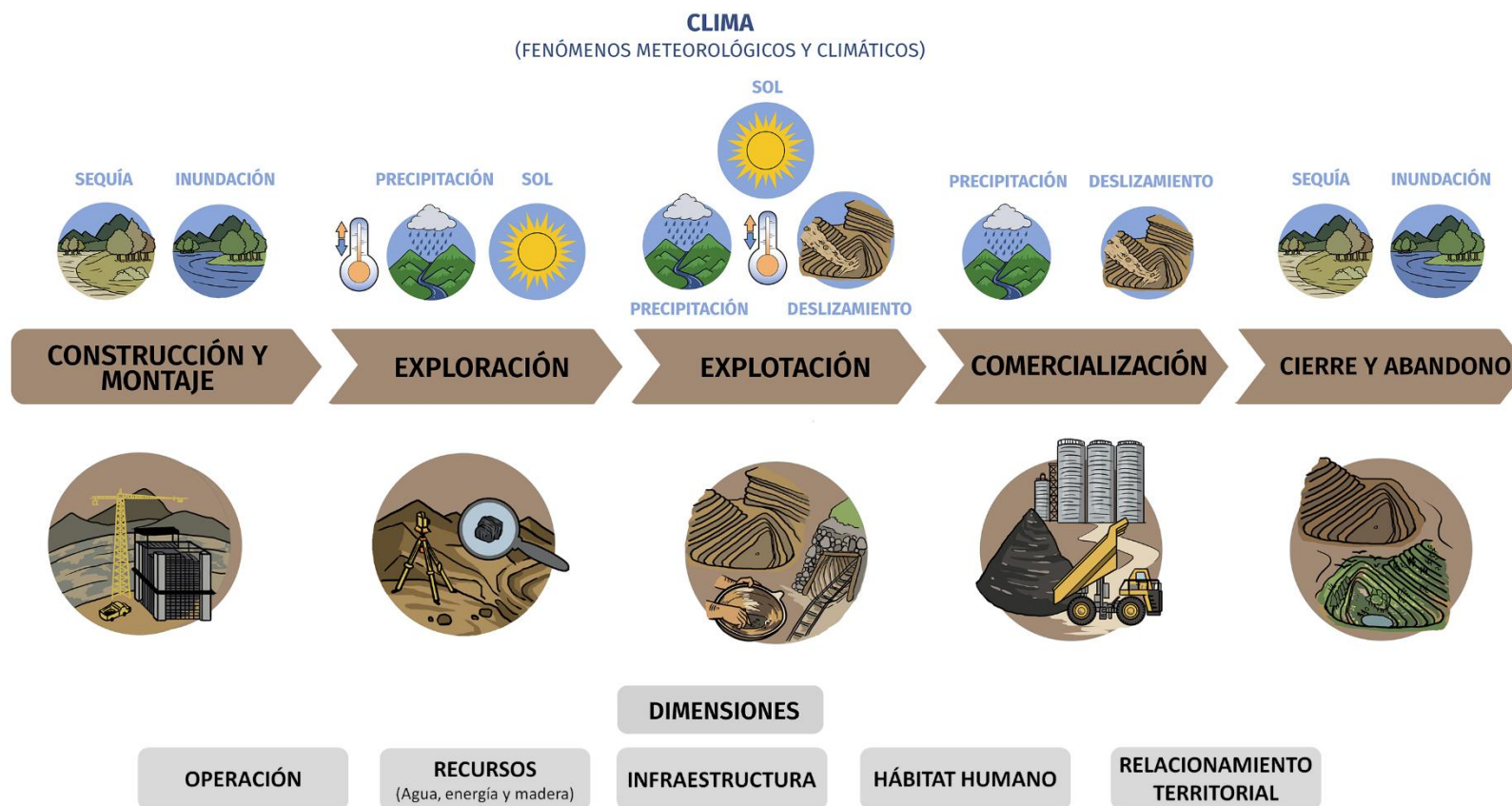


Figura I.1. Representación esquemática de la influencia del clima en diferentes fases de la actividad minera

A continuación, se sintetiza las diferentes formas como el clima influye en los segmentos o fases de la línea de producción minera:

- **Construcción y montaje:** En esta fase, el clima influye en los tiempos y costos asociados a la construcción y el montaje de una operación minera. De este modo, puede modificar la eficiencia en la instalación de equipos, transporte de maquinaria y materiales, así como en la edificación de infraestructuras destinadas a la extracción, procesamiento, transporte o alojamiento. La Figura I.2, ilustra dos tipos de infraestructura minera, artesanal de aluvión y subterránea. Su construcción y montaje dependerán de las condiciones climáticas locales, así como de la época del año donde las condiciones sean favorecedoras para su instalación. Además, la elección de los materiales más apropiados para soportar las características climáticas específicas de precipitación, humedad y temperatura. En condiciones normales o en fases extremas, el clima puede influir en variaciones de los costos previstos, tanto de insumos como de tiempos del proceso.



Figura I.2. Infraestructura para minería artesanal de aluvión (izquierda) y subterránea de metálicos (derecha), tomado de: J. Ángel, et al., 2019.

- **Exploración:** El clima incide en la movilización de insumos, la realización de muestreos, el transporte de muestras y, en general, en las actividades asociadas, causando variaciones en tiempos y costos de exploración. Dependiendo de la ubicación de un proyecto minero, durante esta fase se analiza la posible generación de drenajes mineros, teniendo en cuenta que el clima influye en procesos como la movilización de iones y cationes, lo cual requerirá de un adecuado manejo en las fases posteriores para prever posibles impactos ambientales y operativos.

- **Explotación:** El clima incide en los diferentes tipos de minería, debido a factores como la disponibilidad de agua que es esencial para procesos propios de la actividad. También influye en el manejo de las infraestructuras, las vías de acceso y las condiciones laborales de los trabajadores, lo que puede generar variaciones en tiempos y costos de operación. Asimismo, la temperatura y la precipitación son factores que interactúan con los minerales y sistemas de depósito, por ejemplo, durante la explotación se generan drenajes mineros (Figura 1.3), a partir de la exposición de minerales a las condiciones externas de precipitación y temperatura; dependiendo de las condiciones climáticas locales del proyecto minero, puede variar su ocurrencia e intensidad. De la misma manera, los depósitos de relaves (Figura 1.3) están relacionados con el clima, toda vez que su capacidad de almacenamiento debería contemplar escenarios de cambio climático para una estimación precisa de dicha capacidad.



Figura 1.3. Drenajes mineros (izquierda) tomado de: J. Ángel, et al., 2019, y depósitos de relaves (derecha) tomado de Alfonso, et al., 2021.

- **Comercialización:** La distribución espacial y los tipos de clima inciden en la disponibilidad temporal de las vías a través de las cuales se comercializan los minerales. La exposición de los minerales a las condiciones meteorológicas durante el almacenamiento o transporte puede incidir en la calidad de los productos. Además, la relación entre producción energética y actividad minera, asociada a la variabilidad climática puede influenciar fluctuaciones en la demanda y los costos de minerales energéticos como el carbón.
- **Cierre y abandono:** El clima provee algunas de las condiciones esenciales que facilitan procesos de revegetalización y restauración ecológica en minería a cielo abierto. De la misma manera, incide en los procesos de meteorización química y física de minerales, lo que se relaciona con los procesos de adecuaciones geomorfológicas y de paisaje en los

cierres mineros, así como en las obras de contención de laderas, y en la ocurrencia e intensidad de drenajes mineros. La temperatura y la precipitación son factores que modifican las características y los efectos de los drenajes mineros en esta fase.

I.2.1 Los impactos de la variabilidad climática y del cambio climático en el subsector minería.

A partir de las relaciones expuestas en el capítulo anterior entre el clima y el subsector minero, se evidencia que los fenómenos climáticos extremos impactan diversos aspectos de las distintas fases de la línea de producción minera. Bajo este panorama, y considerando el contexto de actual y posible futuro del cambio climático, se estima una agudización de los efectos negativos de las fases extremas de la variabilidad climática sobre los diferentes aspectos del subsector. A continuación, se resumen los impactos de la variabilidad climática y del cambio climático en cada una de las fases de la línea de producción de la minería:

- **Construcción y montaje:** La exacerbación de las fases extremas de la variabilidad climática impactan en esta etapa, generando posibles retrasos en la instalación de maquinaria, y construcción de infraestructuras necesarias para la extracción de los minerales, aumentando costos y dificultando el acceso de personal, materiales y suministros, especialmente en áreas remotas. Estos incluyen retrasos en las labores, dificultades en la accesibilidad a proyectos alejados, y afectaciones en la seguridad ocupacional de los trabajadores.
- **Exploración:** Las fases extremas de la variabilidad climática pueden dificultar la adecuada ejecución de la programación de las labores de exploración, afectando el acceso a las áreas de trabajo y comprometiendo la seguridad ocupacional de los trabajadores. Esto podría generar, afectaciones en tiempos y costos operativos, dificultando la planificación y avance eficiente de las actividades de exploración.
- **Explotación:** En esta etapa, los efectos de las fases extremas de la variabilidad climática varían de acuerdo con el tipo de minería que se lleve a cabo. En la minería a cielo abierto, la ocurrencia de las precipitaciones extremas puede generar procesos de erosión, remoción en masa, inundaciones y sedimentación, las cuales podría aumentar en frecuencia e intensidad bajo un escenario de incremento en las precipitaciones. Por ejemplo, la Figura I.4 muestra dos tipos de minería de oro, artesanal de barequeo y con retroexcavadora, ambos procesos susceptibles de ser impactados por los fenómenos

antes mencionados. Además, durante épocas de sequía, el manejo de material particulado se intensifica, una situación que se exagera con el aumento gradual de la temperatura global. Por otro lado, la minería aluvial, que depende directamente de los caudales de ríos y fuentes hídricas, se ve particularmente afectada por cambios en los patrones de lluvia y sequía, complicando la extracción de minerales. En cuanto a la minería subterránea, la infiltración de agua puede comprometer la estabilidad estructural. Esto puede ocasionar afectaciones a la infraestructura minera, en las vías de acceso, y en los sistemas de drenaje, lo que genera retos adicionales para la gestión de las aguas, relacionados con inundaciones, y estabilidad de las obras. Sumado a lo anterior, el incremento de las temperaturas, afecta las condiciones laborales de los trabajadores, lo que en conjunto puede alterar las metas de producción y los costos asociados a la operación minera.



Figura 1.4. Minería de oro artesanal y con retroexcavadora (izquierda), tomado de: J. Ángel, et al., 2019.

- Comercialización: Las condiciones extremas de húmedas en el aire pueden afectar la calidad de los minerales; por ejemplo, el carbón o los metales obtenidos mediante minería a cielo abierto, pueden perder calidad a causa de la humedad y las lluvias. Además, las cadenas de suministro y transporte de minerales se pueden ralentizar,

debido a eventos extremos tales como procesos de remoción en masa, hundimientos o inundaciones, que afecten vías terrestres o férreas. Por otro lado, la disminución hídrica a causa de bajas precipitaciones, que afecta la producción hidroeléctrica, puede ocasionar una sobredemanda de minerales energéticos, como el carbón, lo cual puede generar fluctuaciones sobre los precios y presiones sobre la producción.

- Cierre: Los procesos de recuperación ambiental y del paisaje, a través de restauración ecológica, revegetalización o adecuaciones geomorfológicas, especialmente en minas a cielo abierto, pueden verse afectados por el cambio en las fases extremas de la variabilidad climática. Por un lado, la ocurrencia de altas precipitaciones puede comprometer la estabilidad de taludes y estructuras de contención de ladera, además de generar procesos erosivos que afectan las obras de cierre en canteras y socavones; por otro lado, las sequías pueden generar pérdida de especies vegetales utilizadas en los procesos de compensación y restauración ecológica de la mina.

Otro factor relacionado se asocia a la acumulación de agua estancadas en minas abandonadas, los cuales, a cambios en los patrones de lluvias y sequías e incremento de la temperatura, pueden favorecer la proliferación de vectores, por ejemplo, de insectos transmisores de enfermedades como el dengue, malaria y chikunguña.

Es importante considerar que una gestión adecuada del proceso de cierre, que contemple la capacidad de carga hídrica y escenarios de precipitación, junto con una evaluación de la variabilidad climática, puede contribuir a minimizar los riesgos asociados por ejemplo al drenaje minero. Esto es fundamental para evitar la dispersión de metales pesados, ácidos y bases en cuerpos de agua superficiales y subterráneos, derivados de la exposición ambiental y la meteorización química de



minerales. Ver Figura I.5.

Figura I.5. Drenajes mineros en cuerpo de agua superficial, tomado de: J. Ángel, et al., 2019.

I.3. La influencia del clima en el subsector energía

El clima juega un papel influyente en las distintas etapas o fases de la línea de producción de energía (Figura 1.6). De esta manera, el clima incide en diferentes aspectos del proceso relativo a la industria energética (ya sea térmica, hidroeléctrica, geotérmica, eólica y solar), desde la generación hasta la comercialización, variables como la temperatura y la precipitación, junto con sus fases extremas (las cuales regulan la ocurrencia de eventos extremos y la disponibilidad de agua) pueden limitar o favorecer la operatividad y eficiencia de las actividades del sector, generando variaciones en costos, tiempos, cantidades de producción y por ende en la capacidad de abastecimiento de la demanda.

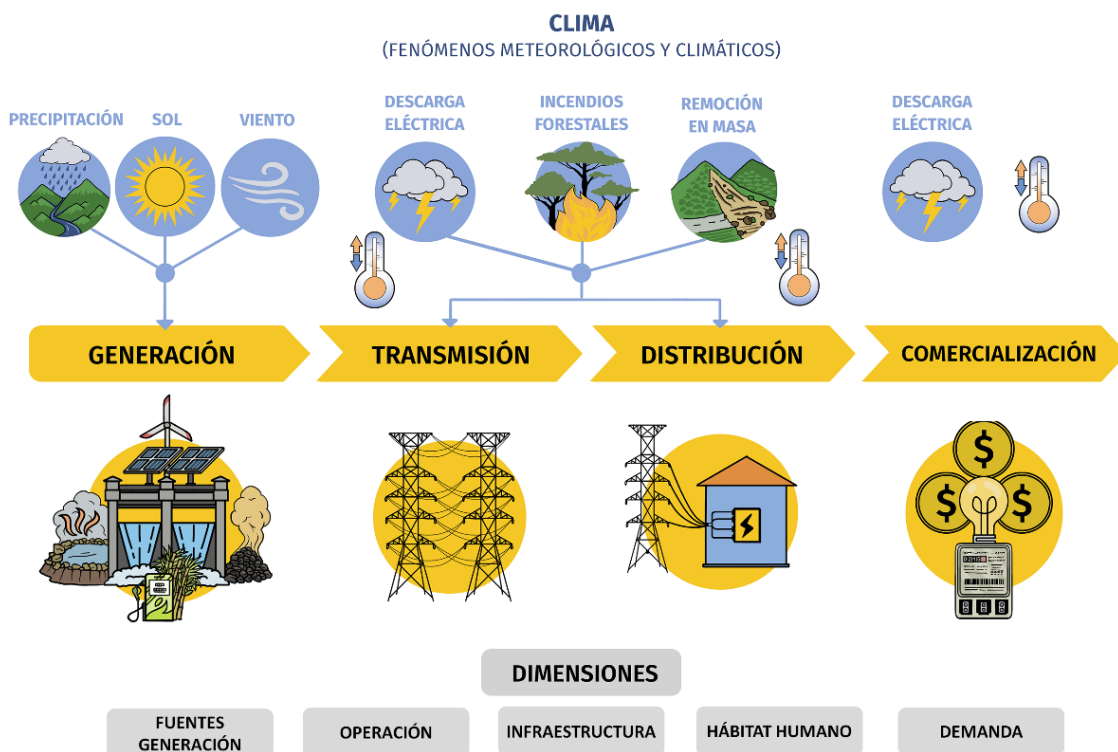


Figura 1.6. Representación esquemática de la influencia del clima en diferentes fases de la cadena de producción de energía

A continuación, se detallan la relación entre el clima en las diferentes fases de la línea de producción del sector energía:

- **Generación:** el clima regula la disponibilidad de agua para la generación de energía eléctrica; la variabilidad climática y sus fases extremas incide en el porcentaje de generación de energía. Por ejemplo, las condiciones de viento, radiación solar y precipitación pueden

favorecer o limitar la producción de energía hidroeléctrica, fotovoltaica y eólica, ya sea por aumento o disminución del caudal de río y niveles de los embalses, así como por la cantidad de radiación solar del territorio que a su vez también se relaciona con la demanda energética de la población dependiendo de eventos como olas de calor. De esta manera, las fases extremas de la variabilidad climática (fenómeno del Niño y la Niña) sumado a una demanda energética que fluctúa de acuerdo con el comportamiento del clima y la incidencia de fases extremas de la variabilidad climática, incidirá en la capacidad de generación para la capacidad de cobertura de la demanda.

- Transmisión: el clima también influye en la operatividad de la infraestructura de las líneas de transmisión. Tanto en condiciones normales como en fases extremas de la variabilidad climática, la ocurrencia de fenómenos extremos como incendios y olas de calor impactan en la infraestructura de transmisión, limitando el potencial de transmisión de los diferentes tipos de energía eléctrica. Por ejemplo, la temperatura afecta la resistividad de los materiales conductores, mientras que la alta humedad puede comprometer el aislamiento de las líneas. Además, eventos como lluvias intensas o acumulación de hielo pueden modificar la eficiencia del transporte de energía
- Distribución: al igual que en la transmisión, la relación entre el clima y la fase de distribución, se centra en la incidencia de las fases extremas de la variabilidad climática a partir de fenómenos extremos que impactan la línea de distribución, desde las subestaciones hasta los puntos o estaciones de carga. Por ejemplo, descargas eléctricas, incendios o cambios extremos de la temperatura pueden alterar la resistividad o capacidad de los conductores eléctricos al paso de corriente eléctrica. Esto se debe a que la resistividad de un conductor es directamente proporcional con el aumento de la temperatura, *“ya que los átomos aumentan la amplitud de su vibración en torno a sus posiciones de equilibrio; con lo cual, obstaculiza el movimiento de la gran cantidad de electrones libres que posee el material conductor”* (García, 2006).
- Comercialización: Las características climáticas de una región influyen directamente en los patrones de consumo de energía. La demanda tiende a incrementarse durante períodos de bajas temperaturas debido al mayor uso de sistemas de calefacción, y en épocas de altas temperaturas por el aumento en el uso de sistemas de refrigeración. La disponibilidad de recursos energéticos también se ajusta a estas variaciones climáticas, regulando la oferta y los costos de comercialización para los usuarios.

I.3.1 Los impactos del cambio climático en el subsector energía

A partir de las relaciones expuestas en el capítulo anterior entre el clima y el subsector energético, se evidencia que los fenómenos climáticos extremos impactan diversos aspectos de las distintas fases de la línea de producción y distribución de la energía. En el contexto actual y futuro del cambio climático, podría ocurrir que estos impactos se intensifiquen debido al aumento de la temperatura, la variabilidad en los patrones de precipitación y la mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos. De esta manera, el cambio climático podría alterar la disponibilidad de recursos clave para la generación de energía, impactando la infraestructura de transmisión y distribución, e incidir en la demanda y los costos de la energía. A continuación, se resumen los principales impactos del cambio climático en cada una de las fases de las fases de producción del sector energético.

- **Generación:** El cambio climático podría afectar diversas fuentes de generación de energía. En el caso de las hidroeléctricas, la disminución de la precipitación y la variabilidad en la disponibilidad hídrica pueden comprometer la capacidad de generación de energía, y aumentar los conflictos por el uso del agua con otros sectores. En el caso de las plantas térmicas, el incremento en la temperatura reduce la eficiencia de los sistemas de refrigeración, lo que aumenta el consumo de agua y energía para mantener la operación. En cuanto a las fuentes renovables, las altas temperaturas pueden afectar el rendimiento de los paneles solares, reduciendo su vida útil y eficiencia, mientras que las alteraciones en los patrones de viento pueden afectar la generación eólica, modificando la capacidad operativa de los parques eólicos, afectando la generación y en consecuencia, aumentando la intermitencia en el suministro.
- **Transmisión:** El incremento de las temperaturas y las olas de calor pueden provocar la dilatación de las líneas de transmisión, reduciendo su capacidad de transporte de electricidad y aumentando la posibilidad de fallos en la infraestructura. Además, el incremento en la frecuencia de eventos como tormentas y vendavales puede generar afectaciones directas en las torres de transmisión, incrementando el riesgo de interrupciones en el suministro.
- **Distribución:** Los cambios en los patrones climáticos extremos, como el aumento en la intensidad de tormentas eléctricas, vendavales e inundaciones, pueden impactar la infraestructura de distribución, afectando redes de media y baja tensión, estaciones transformadoras y subestaciones. Adicionalmente, el incremento de la temperatura puede sobrecargar los transformadores y reducir su eficiencia operativa, generando costos adicionales de mantenimiento y reposición.
- **Comercialización:** El aumento de las temperaturas altera los patrones de consumo energético, generando una mayor demanda en periodos de calor extremo debido al uso

intensivo de sistemas de climatización, lo que puede afectar la estabilidad del suministro. A su vez, los cambios en la oferta de generación eléctrica, asociados a variaciones en la disponibilidad de recursos hídricos y térmicos, pueden generar fluctuaciones en los precios de la energía, afectando la competitividad del sector y la estabilidad del mercado energético.

I.4. La influencia del clima en el subsector hidrocarburos

El clima influye en las distintas etapas o fases de la línea de producción (Figura I.7). Esta relación también depende de otros factores, como la escala de operación (ya sea grande o pequeña escala) y los métodos de extracción, los cuales están determinados por características como el tipo de suelo o el estado de agregación del hidrocarburo. De esta manera, el clima incide en diferentes aspectos del proceso productivo de los hidrocarburos como sector económico. Desde la exploración hasta la comercialización, variables como la temperatura y precipitación, junto con sus fases extremas (las cuales regulan la ocurrencia de eventos extremos y la disponibilidad de agua) pueden limitar o favorecer la operatividad y eficiencia de las actividades del sector, generando variaciones en costos, tiempos de producción y sostenibilidad de los proyectos.

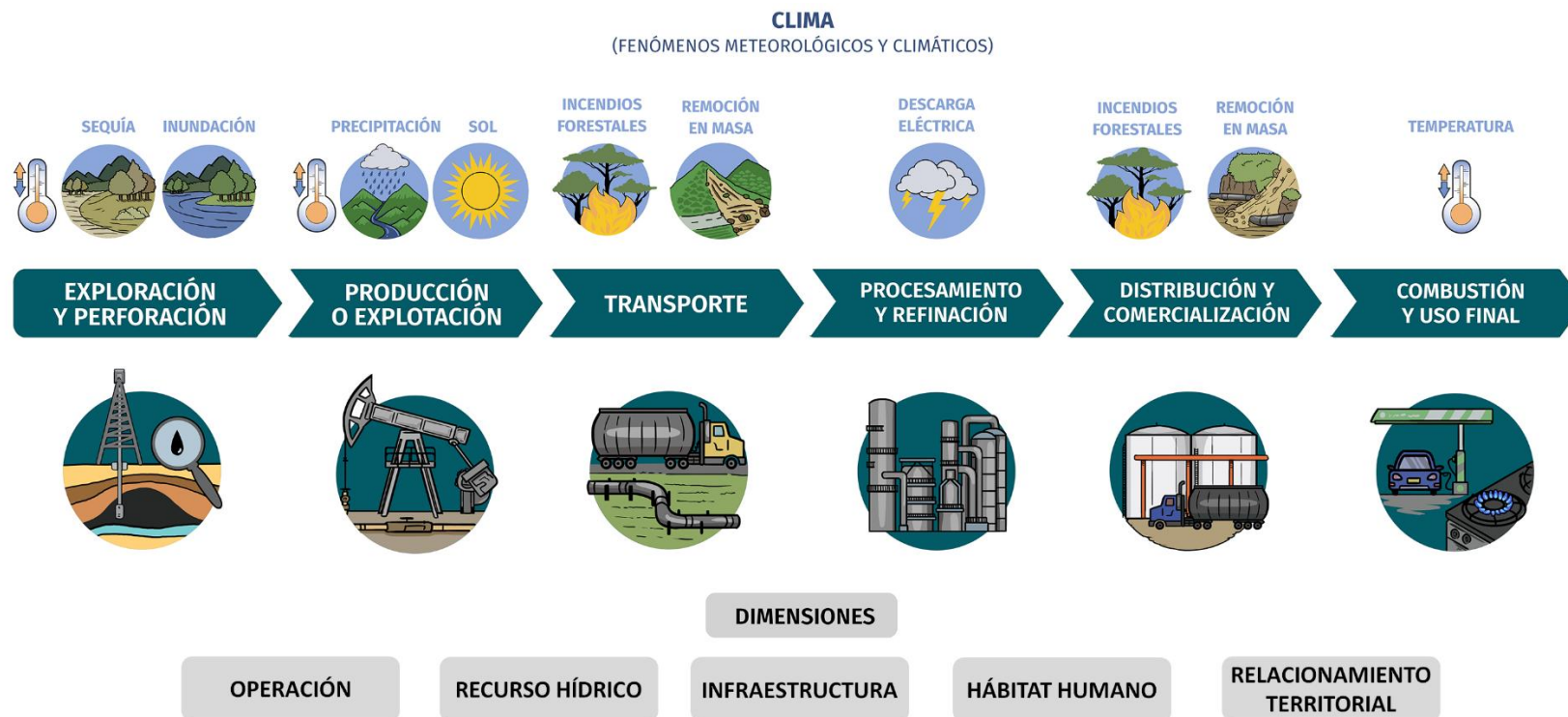


Figura 1.7. Representación esquemática de la influencia del clima en diferentes fases de la cadena de producción de hidrocarburos

A continuación, se detallan los efectos del clima en las diferentes fases de la línea de producción de los hidrocarburos:

- Exploración y producción: El clima regula la disponibilidad de agua para los diferentes procesos de la exploración y producción como las actividades domésticas en campamentos, la perforación, la fracturación hidráulica y la recuperación mejorada de petróleo (EOR - Enhanced Oil Recovery) Esto repercute tanto en los tiempos estimados de exploración y operación, en las condiciones de riesgo laboral del personal de campo y en los costos generales de la actividad operativa. Dependiendo la época del año, el clima (tanto en condiciones normales como en fases extremas de la variabilidad climática) influye en factores clave del proceso productivo. Por ejemplo, las condiciones de temperatura y precipitación pueden favorecer o limitar la perforación y la instalación de geófonos en la exploración sísmica, así como la instalación de la torre de perforación, campamentos y piscinas de lodos en procesos de perforación exploratoria. Además, la temperatura influye en la eficiencia de los procesos de separación de hidrocarburos, impactando el consumo energético necesario para estos procedimientos. En el caso de hidrocarburos extraídos en plataformas marinas, la saturación de agua en el gas varía según la temperatura, lo que puede afectar la calidad del recurso y requerir ajustes en los procesos de tratamiento.

Asimismo, el clima en el territorio, determina las condiciones bioclimáticas que favorecen el desarrollo de cultivos energéticos como la caña de azúcar y la palma africana, empleados para la producción de etanol, biodiésel y combustibles sostenibles de aviación. El rendimiento óptimo de éstos bioenergéticos depende en gran medida de las condiciones de humedad y temperatura durante las diferentes etapas fenológicas de las plantas. Asimismo, las fases extremas de la variabilidad climática impactan en la producción y costos de la cantidad de biomasa producida.

- Distribución: el clima proporciona las condiciones para que las estaciones de servicio y las redes de servicio funcionen de acuerdo con las condiciones promedio de temperatura, precipitación y vientos. Dentro de las características climáticas de una región se pueden presentar eventos extremos como fuertes vientos que ocasionan vendavales, altas temperaturas, sequías y lluvias intensas, lo que puede afectar la infraestructura y el proceso de distribución, generando interrupciones o daños en los sistemas de transporte y almacenamiento de hidrocarburos.
- Abastecimiento: el clima también incide en la operatividad de terminales portuarias y la logística marítima de importación y exportación de hidrocarburos. Tanto en condiciones normales o en fases extremas de la variabilidad climática el consumo de combustibles

puede variar en distintas regiones del país, situación que puede afectar la capacidad de abastecimiento. De la misma manera, la infraestructura de almacenamiento requerida para el abastecimiento se encuentra condicionada por las condiciones de humedad y temperatura, ya que estas variables inciden en los volúmenes de almacenamiento y en la conservación del recurso.

- Comercialización: la comercialización y el abastecimiento se encuentran estrechamente relacionadas, toda vez que las características climáticas de una región influyen en las condiciones que regulan la demanda de hidrocarburos, y por ende en su suministro. Por ejemplo, variaciones extremas en la temperatura, tienen una incidencia directa con la demanda de productos como el gas natural y la gasolina. Ahora bien, la comercialización está vinculada a la calidad del producto, la cual se puede mantener o deteriorar debido a condiciones de temperatura y humedad externa a lo largo de las demás fases de la línea de producción (a excepción del cierre), influyendo en última instancia en los márgenes de ganancia.
- Transporte: el transporte de hidrocarburos se realiza a través de diversas rutas que incluyen oleoductos, gasoductos, transporte terrestre, fluvial, ferroviario y marítimo (ANDI-ANH, 2009, p.9), cada una de las cuales está influenciada por las condiciones climáticas. La distribución geográfica de los distintos tipos de clima, junto con la ocurrencia de eventos hidroclimáticos e hidrometeorológicos extremos, inciden en la disponibilidad temporal de estos medios a través de las cuales se movilizan los hidrocarburos, así como las características físico-químicas del material transportado, y la continuidad del suministro. Por ejemplo, el transporte terrestre o los ductos pueden verse afectados por la ocurrencia de eventos hidroclimáticos e hidrometeorológicos extremos en las vías, mientras que las variaciones de la temperatura influyen en la evaporación de combustibles, alterando sus características de viscosidad y su calidad. De este modo, estas condiciones influenciadas por el clima afectan tanto la eficiencia del transporte, los costos operativos y la seguridad en la cadena de suministro.
- Cierre y abandono: el clima ofrece las condiciones que regulan los procesos de revegetalización y restauración ecológica en las áreas de cierre y abandono de proyectos hidrocarburíferos; si las especies seleccionadas para la revegetalización son las apropiadas para la región, el adecuado desarrollo de las fases fenológicas de estas especies dependerá de las condiciones de temperatura y humedad en cada momento. Condiciones climáticas adecuadas pueden favorecer la regeneración natural, mientras que eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas o lluvias intensas, pueden dificultar la recuperación del área intervenida.

I.4.1 Los posibles impactos del cambio climático en el subsector hidrocarburos.

En el largo plazo se presentará la modificación paulatina de las condiciones climáticas de cada territorio mundial, conocido como cambio climático. Dicha modificación también afectará el territorio colombiano. Esto afectará las actividades productivas sectoriales, entre ellas, la producción de hidrocarburos. De esta manera, se prevé un aumento de la temperatura, alteraciones en los patrones de precipitación y una intensificación de los efectos negativos por fases extremas de la variabilidad climática (CAR-UNAL, 2024, p. 30).

A continuación, se resumen los impactos del cambio climático en cada una de las fases de la línea de producción de hidrocarburos:

- Exploración y producción: el incremento en la frecuencia y duración de sequías exacerba la escasez hídrica, impactando procesos clave como la fracturación hidráulica, la recuperación mejorada de petróleo (EOR) y la inyección de agua en pozos. Esta situación también limitaría las actividades operativas y domésticas en los campamentos y podría fomentar conflictos por el uso del agua en territorios donde es compartida con otros actores como comunidades locales u otros sectores económicos.

Por otro lado, el aumento progresivo de las temperaturas elevaría los riesgos laborales, aumentando la incidencia de como golpes de calor en el personal, además de generar mayores costos operativos debido al mayor consumo energético necesario para separar hidrocarburos. En el caso de operaciones offshore, la calidad del gas extraído se ve comprometida por la variación en la saturación de agua asociada al aumento térmico, lo que exige tratamientos adicionales y reprocesamientos.

Además, en zonas susceptibles a inundaciones, como algunas regiones de llanura, como en la Orinoquía, sabanas caribeñas y valles interandinos, entre otras, la exacerbación de las fases extremas de la variabilidad climática puede repercutir en el incremento de desastres de este tipo. Por otro lado, los periodos de lluvia prolongados favorecen enfermedades en las plantas, como la pudrición del cogollo en la palma africana, lo que puede causar reducción en los rendimientos de la biomasa y generar problemas de abastecimiento y costos de bioenergéticos, afectando tanto la disponibilidad como la estabilidad de esta fuente energética.

- Distribución: el cambio en la frecuencia de vientos fuertes que ocasionan vendavales impacta en la infraestructura de distribución, incluyendo estaciones de servicio y redes de tuberías, lo que puede interrumpir el suministro continuo de los recursos derivados de hidrocarburos. Esta situación podría verse exacerbada bajo un escenario de cambio

climático donde la recurrencia de estos fenómenos sea mayor. Por otro lado, el incremento de las temperaturas acelera la evaporación de hidrocarburos lo que impacta en la merma por evaporación del combustible en las estaciones de servicio, generando mayores emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV).

- **Abastecimiento:** El aumento de las temperaturas en distintas regiones puede generar un incremento en el consumo de combustibles, lo que podría generar tensiones en la capacidad de abastecimiento. Además, el incremento en las temperaturas acelera la evaporación de los combustibles en los tanques de almacenamiento, alterando su viscosidad, y dificultando su manipulación y transporte. Estos factores pueden afectar la eficiencia operativa y aumentar los costos y ganancias asociadas con la comercialización. Por otro lado, el incremento en la frecuencia de eventos extremos como lluvias intensas podrían desencadenar la ocurrencia de movimientos en masa, incrementando la ocurrencia de accidentes y derrames que comprometen la integridad de los tanques de almacenamiento.
- **Comercialización:** Como se mencionó en la fase anterior, los cambios físico-químicos en los productos hidrocarburíferos, resultado del aumento de la temperatura del aire, puede generar afectaciones en la estabilidad de la cadena de suministro, afectando la estabilidad de los mercados y provocando pérdidas económicas estimadas para un volumen determinado de hidrocarburos.
- **Transporte:** Las altas temperaturas pueden provocar la dilatación de los oleoductos, afectando su integridad estructural y aumentando la probabilidad de ocurrencia de fugas. Además, la evaporación de hidrocarburos en los tanques de transporte, especialmente durante períodos de calor extremo, incrementa tanto las pérdidas económicas como la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV).

Por otro lado, eventos climáticos extremos como inundaciones, lluvias torrenciales y deslizamientos de tierra generan interrupciones en las rutas de transporte terrestre y ferroviario, afectando los tiempos de entrega y aumentando los costos logísticos. En el transporte marítimo, la intensificación y aumento de frecuencia de tormentas puede obligar a realizar desvíos o implementar medidas adicionales de seguridad, lo que incrementa los costos operativos.

- **Cierre y abandono:** la exacerbación de las fases extremas de la variabilidad climática, como lluvias intensas y sequías prolongadas, dificultan los procesos de restauración ecológica en áreas de cierre y abandono de proyectos de hidrocarburos. La erosión acelerada por lluvias torrenciales dificulta la revegetalización, mientras que la acumulación de agua en fases tempranas de las plántulas podría ahogar a los individuos; así mismo el estrés hídrico en individuos arbóreos sumado al incremento de temporadas de calor, provocan el marchitamiento vegetal.

Un aspecto transversal que involucra todas las fases, se trata de la infraestructura requerida para las operaciones del sector. Esta se puede ver afectada de distintas formas, con el cambio paulatino en los patrones de precipitación, el aumento de la temperatura y la variación de las fases extremas de la variabilidad climática. Fenómenos como olas de calor, sequías prolongadas y cambios en la cantidad de agua disponible para las diferentes operaciones, así como eventos como inundaciones o remociones en masa, pueden ocasionar daños significativos en los distintos tipos de infraestructura del sector, incrementando su vulnerabilidad a incidentes como derrames, fallos estructurales y limitaciones en la continuidad del suministro de hidrocarburos y productor derivados.

Referencias Bibliográficas

Ángel, J., Ordoñez, M., Olivero, J., Echavarría, C., Ayala, H., Cabrera, M. (2019). Consideraciones sobre la minería en el departamento del Chocó y recomendaciones para mejorar la gestión. Geopatrimonio – Universidad de Cartagena - IIAP - WWF. Páginas 58. Cali – Colombia.

Ciscar, J.C., Dowling, P., (). Integrated assessment of climate impacts and adaptation in the energy sector. *Energy Economics* 46 (2014) 531–538

García-Carmona, A. (2006). Influencia de la temperatura en el comportamiento eléctrico de los materiales: Análisis de su comprensión y dificultades de aprendizaje. *Investigações em Ensino de Ciências*, 11(1), 67-83.

Herrán, O., Bonilla, J., Velandia, N., Jiménez, D., Martínez, H., Alfonso, M., López, O., Martínez, P., Teherán, R., Barragán, N., & Meneses, R. (2021). Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos relacionados con drenajes ácidos mineros (DAM) (GGC-468-2020). Ministerio de Minas y Energía, Dirección de Minería Empresarial, Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda.

Mideksa, T.K., Kallbekken, S. (2010). The impact of climate change on the electricity market: A review. *Energy policy*. 8(2010)3579–3585

OLADE (2016). Cambia la energía, cambia el clima. Cambio climático y su impacto en el sector energético. Organización Latinoamericana de Energía. Cuenca-Ecuador, 20 p.

Teotónio, C., Fortes, P., Roebeling, P., Rodriguez, M., Robaina-Alves, M. (2017). Assessing the impacts of climate change on hydropower generation and the power sector in Portugal: A partial equilibrium approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017) 788–799



Contratos GGC 1113-2024 y GGC 1949-2025

Suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad Nacional de Colombia con el objeto de “Prestar servicios para apoyar el desarrollo de las actividades priorizadas de mediano y largo plazo contenidas en el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático 2050” y “Prestar Servicios de investigación Científica para la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático PIGCCme 2050 a través de la implementación del Sistema de Información Climática del MME”



PARTE II

Escenarios de cambio climático, desarrollados para el sector minero energético

• Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	21
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO SSP.....	¡Error! Marcador no definido.
MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES UTILIZADOS	31
INFORMACIÓN OBSERVADA	33
REFINAMIENTO ESTADÍSTICO DE ESCALA ESPACIAL	42
3. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA COLOMBIA	42
PRECIPITACIÓN.....	42
TEMPERATURA MEDIA	46
TEMPERATURA MÁXIMA.....	48
TEMPERATURA MÍNIMA	¡Error! Marcador no definido.
RADIACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
VELOCIDAD DEL VIENTO.....	¡Error! Marcador no definido.
HUMEDAD RELATIVA.....	¡Error! Marcador no definido.
4. CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS.....	63



Contratos GGC 1113-2024 y GGC 1949-2025

Suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad Nacional de Colombia con el objeto de “Prestar servicios para apoyar el desarrollo de las actividades priorizadas de mediano y largo plazo contenidas en el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático 2050” y “Prestar Servicios de investigación Científica para la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático PIGCCme 2050 a través de la implementación del Sistema de Información Climática del MME”



Tabla de figuras

Figura 1. Escenarios de Cambio Climático del Sexto Reporte de Evaluación (AR6) del IPCC: Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP). Fuente: Modificado de https://climatedata.ca/resource/understanding-shared-socio-economic-pathways-ssps/	31
Figura 2. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de precipitación para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 3. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de temperatura media para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 4. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de temperatura máxima para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia. ..	37
Figura 5. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de temperatura mínima para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia....	38
Figura 6. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de radiación solar para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 7. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de velocidad del viento para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 8. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de humedad relativa para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 9. Precipitación anual histórica promedio del periodo 1991-2020, y cambios porcentuales futuros proyectados bajo los escenarios SSP2-4.5 y 3-7.0 para Colombia. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 10. Temperatura media anual histórica promedio del periodo 1991-2020, y cambios futuros proyectados (en °C) bajo los escenarios SSP2-4.5 y 3-7.0 para Colombia. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 11. Temperatura máxima anual histórica promedio del periodo 1991-2020, y cambios futuros proyectados (en °C) bajo los escenarios SSP2-4.5 y 3-7.0 para Colombia. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 12. Temperatura mínima anual histórica promedio del periodo 1991-2020, y cambios futuros proyectados (en °C) bajo los escenarios SSP2-4.5 y 3-7.0 para Colombia. Fuente: Elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.

Figura 13. Radiación solar anual histórica promedio del periodo 1991-2020, y cambios futuros proyectados (en W/m^2) bajo los escenarios SSP2-4.5 y 3-7.0 para Colombia. Fuente: Elaboración propia. 59

Figura 14. Velocidad del viento anual histórica promedio del periodo 1991-2020, y cambios futuros proyectados (en m/s) bajo los escenarios SSP2-4.5 y 3-7.0 para Colombia. Fuente: Elaboración propia. 62

Figura 15. Humedad relativa anual histórica promedio del periodo 1991-2020, y cambios futuros proyectados (en %) bajo los escenarios SSP2-4.5 y 3-7.0 para Colombia. Fuente: Elaboración propia. 57

1. Introducción

El cambio climático ha sido reconocido como un desafío para el desarrollo de los países y el bienestar de ecosistemas y sociedades. Según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) producen el aumento de la temperatura media a nivel global, lo cual altera el sistema climático y ocasiona impactos tales como el aumento del nivel del mar, cambios en los patrones de la precipitación y una mayor intensidad y frecuencia de los eventos extremos de origen climático (IPCC, 2014).

En el contexto del cambio climático, para poder entender cómo podrían cambiar las variables climáticas bajo distintos niveles de concentración de gases de efecto invernadero de origen antropogénico, se hace necesario el uso de escenarios. Éstos se entienden como descripciones coherentes, internamente consistentes y convincentes de un posible estado futuro del mundo, y en este caso, del clima (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería, 2015). Los escenarios no deben asumirse como pronósticos o predicciones, cada escenario es una imagen alternativa de cómo el futuro puede mostrarse bajo determinadas condiciones en un tiempo dado. Y por lo general se utiliza un conjunto de ellos con el fin de mostrar, de la mejor manera posible, el rango de incertidumbre en las proyecciones climáticas.

En el proyecto “2024 – CONTRATO INTERADMINISTRATIVO No. 1113-2024 CELEBRADO CON EL MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA”, con el fin de determinar los posibles efectos del cambio climático en el sector minero-energético de Colombia, es necesario proyectar las condiciones climáticas que se darían a lo largo del siglo XXI, y así estimar las posibles consecuencias que éstas ocasionarían en diversas dimensiones del territorio (infraestructura, recursos hídricos, ecosistemas, salud, hábitat humano, entre otras). A continuación, se presentan los resultados de los escenarios de cambio climático elaborados en alta resolución espacial para Colombia, a partir de la información generada en el CMIP6 (*Climate Models Intercomparison Project versión 6*) utilizando los escenarios SSP (*Socioeconomical Shared Pathways*) del Sexto Reporte de Evaluación del IPCC (AR6). Se presentan las proyecciones climáticas futuras de 7 variables climáticas: precipitación, temperaturas media, máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Los cambios futuros se proyectaron para los periodos futuros: 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100, en comparación con el periodo histórico 1991-2020, y bajo dos de los escenarios del último informe de evaluación del cambio climático del IPCC (AR6): SSP2-4.5 y SSP3-7.0.



Contratos GGC 1113-2024 y GGC 1949-2025

Suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad Nacional de Colombia con el objeto de “Prestar servicios para apoyar el desarrollo de las actividades priorizadas de mediano y largo plazo contenidas en el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático 2050” y “Prestar Servicios de investigación Científica para la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático PIGCCme 2050 a través de la implementación del Sistema de Información Climática del MME”



2. Materiales y métodos

En la actualidad está disponible la información de escenarios de cambio climático liberados con ocasión del Sexto Reporte de Evaluación (AR6) del IPCC, que ofrece un nuevo conjunto de escenarios, denominados SSP (*Socioeconomic Shared Pathways*) (Figura 1), los cuales se agrupan según las emisiones-concentraciones-forzamiento radiativo que habría bajo diferentes supuestos de desarrollo socioeconómico global o regional. Se plantearon 5 escenarios SSP, diseñados como una combinación con la versión actualizada de los escenarios RCP (*Representative Concentration Pathways*) del anterior reporte AR5 (Escoto-Castillo, Peña, & Delgado, 2017). Los nuevos SSP se definieron tomando en consideración los forzamientos radiativos estabilizados por diferentes acciones de mitigación:

- SSP1 o de Sostenibilidad, implica bajos esfuerzos en mitigación y en adaptación (Nivel de forzamiento radiativo de 2.6 W/m^2); el calentamiento global estaría ente 1.0°C y 1.8°C (SSP1-1.9) o entre 1.3°C y 2.4°C (SSP1-2.6) a finales del siglo XXI;
- SSP2 o Intermedio, con esfuerzos medianos de la mitigación y la adaptación (Nivel de forzamiento radiativo de 4.5 W/m^2); el calentamiento global podría estar entre 2.1°C y 3.5°C terminando el siglo XXI;
- SSP3 o de Rivalidad regional, implica grandes retos en cuanto a mitigación y la adaptación (Nivel de forzamiento radiativo de 7.0 W/m^2); el calentamiento global se aproximaría al umbral de 2.8°C - 4.6° para el final del siglo XXI;
- SSP4 o de Desigualdad, con bajos esfuerzos en mitigación y altos retos en adaptación (Nivel de forzamiento radiativo de 6.0 W/m^2); el calentamiento global podría estar entre los 3.0°C y los 5.0°C (aunque IPCC, 2021, no lo define ni contempla este escenario) para el final del siglo XXI;
- SSP5 o de Desarrollo impulsado por la quema de combustibles fósiles, implica grandes retos en mitigación y bajos en adaptación (Nivel de forzamiento radiativo de 8.5 W/m^2); el calentamiento global estaría en el intervalo de los 3.3°C y 5.7°C para el final del siglo XXI.

En el caso del establecimiento de las condiciones climáticas que se presentarían en diferentes períodos del siglo XXI sobre Colombia, se tomó la información generada por modelos del CMIP6 bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0, en consideración a que estos son los más plausibles tomando en cuenta el desarrollo actual de los procesos socioeconómicos y políticos mundiales.

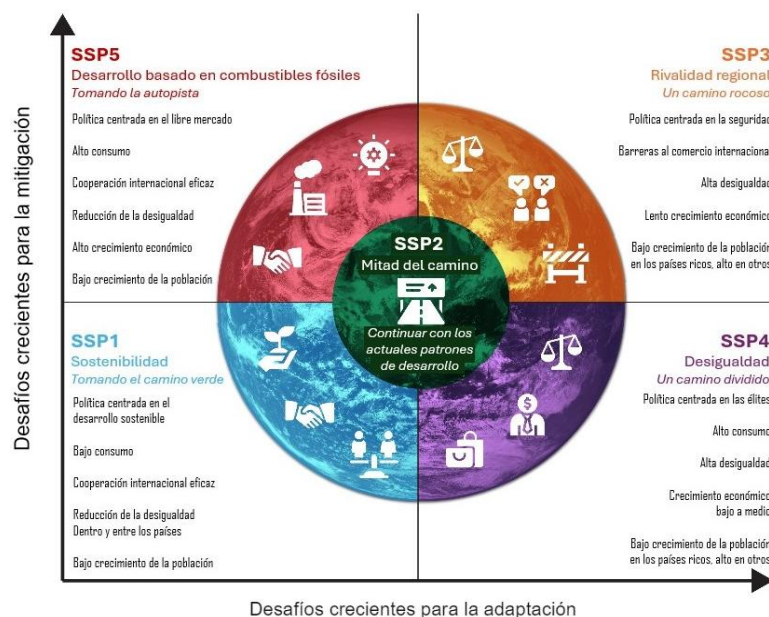


Figura 1. Escenarios de Cambio Climático del Sexto Reporte de Evaluación (AR6) del IPCC: Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP). Fuente: Modificado de <https://climatedata.ca/resource/understanding-shared-socio-economic-pathways-ssps/>

Los modelos climáticos globales utilizados para la elaboración de escenarios de clima futuro para Colombia

Para la selección de los modelos a utilizar para los escenarios de cambio climático SSP, en primer lugar se realizó el inventario de aquellos disponibles en la base de datos del proyecto CMIP6 (Eyring, y otros, 2016), revisando los datos generados por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), a través del proyecto NEX-GDDP (*NASA Earth eXchange - Global Daily Downscaled Projections*) (Thrasher, y otros, 2022), quienes realizaron la reducción de escala de los datos de precipitación, temperaturas media, máxima y mínima y otras variables para 25 de los 80 modelos del CMIP6 (Estos criterios, en términos generales, indican que los modelos climáticos globales que los cumplan no están haciendo una sobre o sub estimación poco plausible del aumento de la temperatura que podría tener el planeta a lo largo del siglo XXI, y con lo cual las proyecciones de éstos serían más probables de darse).

Tabla 1), generando datos a escala diaria y a una resolución espacial de 25x25Km, tanto para el periodo histórico 1961-2014 como para el periodo futuro 2011-2100 de 4 de los 5 escenarios SSP del Sexto Reporte de Evaluación del IPCC (AR6) (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5).

El siguiente paso consistió en la revisión de cuáles de estos 25 modelos cumpliesen con dos criterios clave en las proyecciones futuras de calentamiento global: un ECS1 dentro del umbral de 2.5 - 4.0°C y un TCR2 dentro del umbral de 1.4 - 2.2°C. Estos criterios, en términos generales, indican que los modelos climáticos globales que los cumplan no están haciendo una sobre o sub estimación poco plausible del aumento de la temperatura que podría tener el planeta a lo largo del siglo XXI, y con lo cual las proyecciones de éstos serían más probables de darse.

Tabla 1. Listado de modelos disponibles del CMIP6 en el proyecto NASA NEX-GDDP.

MODELO	INSTITUCIÓN	PAÍS
ACCESS-CM2	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), ARCCSS (Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science)	Australia
ACCESS-ESM1-5	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)	Australia
BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center	China
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Environment and Climate Change	Canadá
CMCC-ESM2	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	Italia
CNRM-CM6-1	CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques), CERFACS (Centre Europeen de Recherche et de Formation Avancee en Calcul Scientifique)	Francia
CNRM-ESM2-1		
EC-Earth3	AEMET, Spain; BSC, Spain; CNR-ISAC, Italy; DMI, Denmark; ENEA, Italy; FMI, Finland; Geomar, Germany; ICHEC, Ireland; ICTP, Italy; IDL, Portugal; IMAU, The Netherlands; IPMA, Portugal; KIT, Karlsruhe, Germany; KNMI, The Netherlands; Lund University, Sweden; Met Eireann, Ireland; NLeSC, The Netherlands; NTNU, Norway; Oxford University, UK; surfSARA, The Netherlands; SMHI, Sweden; Stockholm University, Sweden; Unite ASTR, Belgium; University College Dublin, Ireland; University of Bergen, Norway; University of Copenhagen, Denmark; University of Helsinki, Finland; University of Santiago de Compostela, Spain; Uppsala University, Sweden; Utrecht University, The Netherlands; Vrije Universiteit Amsterdam, the	Varios países de Europa
EC-Earth3-Veg-LR		
FGOALS-g3	Netherlands: Wageningen University, The Netherlands. Mailing address: EC-Earth consortium, Rosshv Center	China
GFDL-ESM4	National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	Estados Unidos
GISS-E2-1-G	Goddard Institute for Space Studies	Estados Unidos
INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics, Russian Academy of Science	Rusia
INM-CM5-0		
IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace	Francia
KACE-1-0-G	National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration, Climate Research Division	Corea del Sur
MIROC6	JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology), AORI (Atmosphere and Ocean Research Institute), NIES (National Institute for Environmental Studies), and R-CCS (RIKEN Center for Computational Science)	Japón
MIROC-ES2L		

¹ **ECS** (*Equilibrium climate sensitivity*): Es el incremento de la temperatura del aire (equilibrio global de la temperatura media del aire cerca de la superficie) en el largo plazo como respuesta a una duplicación del CO₂ atmosférico (IPCC, 2021).

² **TCR** (*Transient climate response*): El cambio en la temperatura media global del aire cerca de la superficie, promediada para un período de 20 años, centrada en el tiempo de la duplicación del CO₂ atmosférico, en una simulación con modelo climático en la que las concentraciones de CO₂ atmosférico se incrementan 1% cada año (IPCC, 2021).

MODELO	INSTITUCIÓN	PAÍS
MPI-ESM1-2-HR	MPI-M (Max Planck Institute for Meteorology); DWD (Deutscher Wetterdienst), and DKRZ (Deutsches Klimarechenzentrum)	Alemania
MPI-ESM1-2-LR	MPI-M (Max Planck Institute for Meteorology); AWI (Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research); DWD (Deutscher Wetterdienst), and DKRZ (Deutsches Klimarechenzentrum)	Alemania
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute	Japón
NorESM2-LM	NorESM Climate modeling Consortium consisting of CICERO (Center for International Climate and Environmental Research), MET-Norway (Norwegian Meteorological Institute), NERSC (Nansen Environmental and Remote Sensing Center), NILU (Norwegian Institute for Air Research), UiB (University of Bergen), UiO (University of Oslo) and UNI (Uni Research)	Noruega
TaiESM1	Research Center for Environmental Changes	Taiwan
UKESM1-0-LL	MOHC (Met Office Hadley Centre) (UK); NERC (Natural Environment Research Council, STFC-RAL) (UK); NIMS-KMA (National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration, Climate Research Division) (Korea); and NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research) (New Zealand)	Reino Unido, Corea del Sur y Nueva Zelanda

De estos 25 modelos climáticos globales, únicamente 4 cumplieron con los umbrales del ECS y del TCR: CMCC-ESM2, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR y MRI-ESM2-0. Con estos 4 modelos se generó el ensamble multimodelo, el cual corresponde a las proyecciones futuras finales de los escenarios de cambio climático, y a partir de los mismos, se generaron los promedios anuales multianuales de cada variable para los periodos: 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100, comparándolos con los promedios del periodo histórico 1991-2020, con el fin de analizar los cambios que se darían a futuro en las variables climáticas.

Validación de los datos generados por los modelos con información registrada en estaciones climatológicas.

La información observada utilizada para la elaboración de los escenarios de cambio climático para Colombia consistió en la combinación de las normales climatológicas oficiales del IDEAM3 del periodo 1991-2020, con los datos de estaciones hidrometeorológicas disponibles del Instituto con información suficiente y confiable para ese mismo periodo. Se utilizaron, para cada variable climática analizada, la siguiente cantidad de estaciones:

- 1509 para precipitación (Figura 2).
- 226 para temperatura media (Figura 3).
- 177 para temperatura máxima (Figura 4).
- 230 para temperatura mínima (Figura 5).

³ Disponibles en <http://archivo.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>

- 46 para radiación solar (Figura 6).
- 28 para velocidad del viento (
- Figura 7).
- 39 para humedad relativa (Figura 8).

Con estos datos, se generaron los promedios anuales multianuales para todo el país, a una resolución espacial de 1 kilómetro para cada una de las variables climáticas.

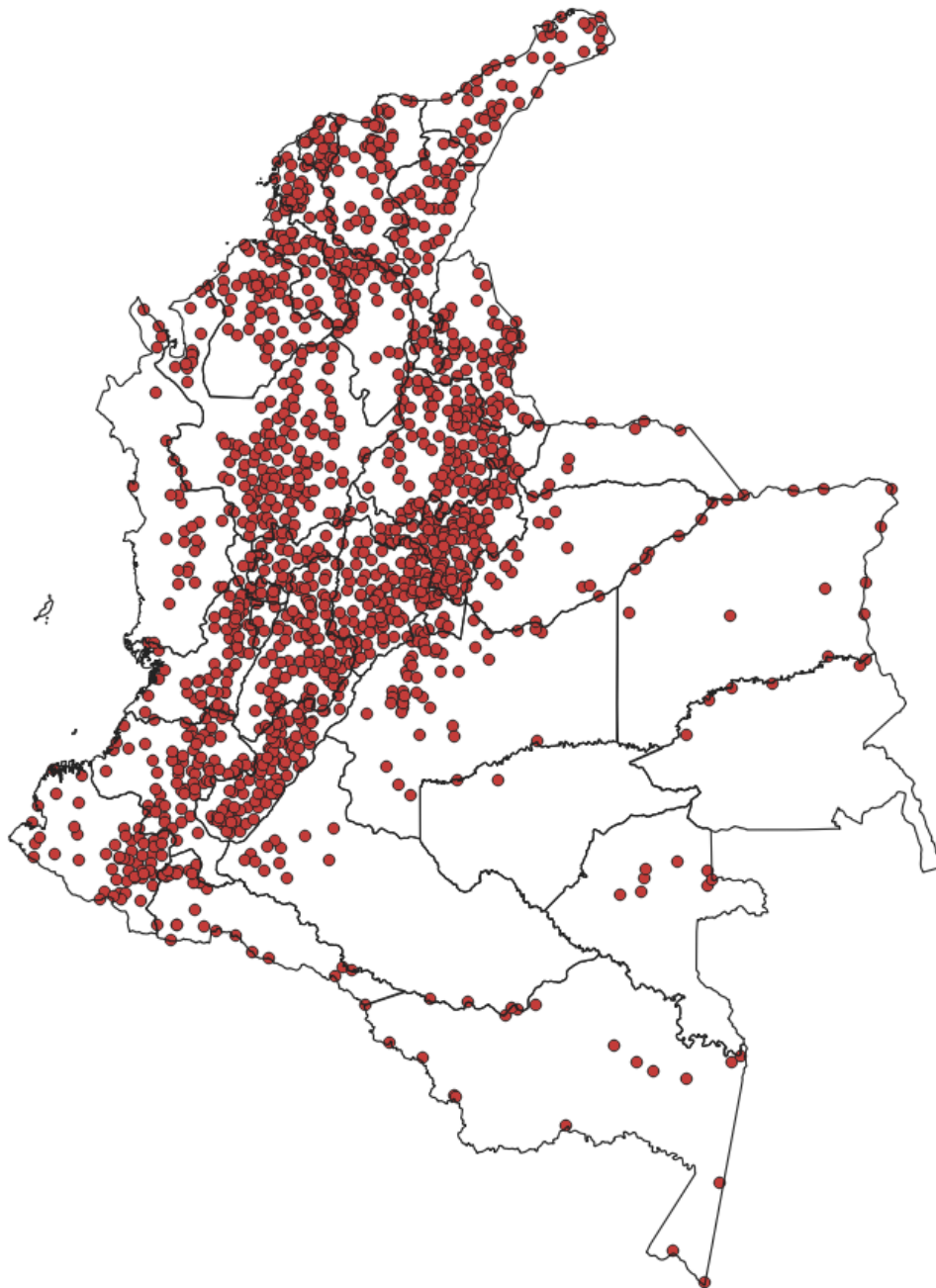


Figura 2. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de precipitación para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de temperatura media para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de temperatura máxima para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de temperatura mínima para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de radiación solar para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de velocidad del viento para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.



Figura 8. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas con información suficiente y confiable de humedad relativa para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia.

Refinamiento estadístico de escala espacial

Con la información observada y la de los modelos climáticos globales de los escenarios de cambio climático, el siguiente paso consiste en la aplicación del método de reducción de escala, con el fin de, en términos generales, tener los datos de cada modelo ajustados a la resolución de los datos observados. El método aplicado consiste en el de reducción de escala estadístico BCSD (*Bias Correction and Spatial Downscaling*) (Xu & Wang, 2019), en el cual, primero, se busca reducir la diferencia entre los valores observados y los valores simulados mediante la aplicación de un factor de ajuste a los datos simulados por los modelos globales, de la siguiente forma:

$$X^* = \alpha X^{mod}$$

Donde X^* es el valor ajustado de la variable; X^{mod} es el valor futuro simulado de la variable del modelo mod , y α es el factor de ajuste, el cual se calcula como:

$$\alpha = \frac{\overline{X^{obs}}}{\overline{X^{mod}}}$$

Siendo $\overline{X^{obs}}$ el promedio multianual de la serie de datos observados; y $\overline{X^{mod}}$ el promedio multianual de la serie de datos simulados (Pabón-Caicedo, 2011).

Luego, a estos valores ajustados se les aplica una desagregación espacial tomando como base los patrones de las variables climáticas para la zona de estudio, llevando los datos de los modelos a una escala más detallada aplicando técnicas de interpolación y utilizando los datos de la topografía en alta resolución de la zona de interés. Este proceso se aplicó tanto a cada uno de los 4 modelos seleccionados como al ensamble multimodelo utilizado como proyecciones climáticas futuras finales.

3. Proyecciones de cambio climático para Colombia

Con base en los materiales y métodos descritos anteriormente, a continuación, se presentan los cambios anuales futuros proyectados para Colombia en las variables climáticas: Precipitación, Temperaturas Media, Máxima y Mínima, Radiación, Velocidad del Viento y Humedad Relativa, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 en los periodos 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100, en comparación con el periodo histórico 1991-2020.

Cambios en la precipitación anual

La Figura 9 muestra la distribución espacial de la precipitación anual estimada para el período 1991-2020 con base en registros de estaciones climatológicas. Esta, se toma como referencia para estimar los cambios que habría en períodos futuros en los dos escenarios tomados para el análisis.

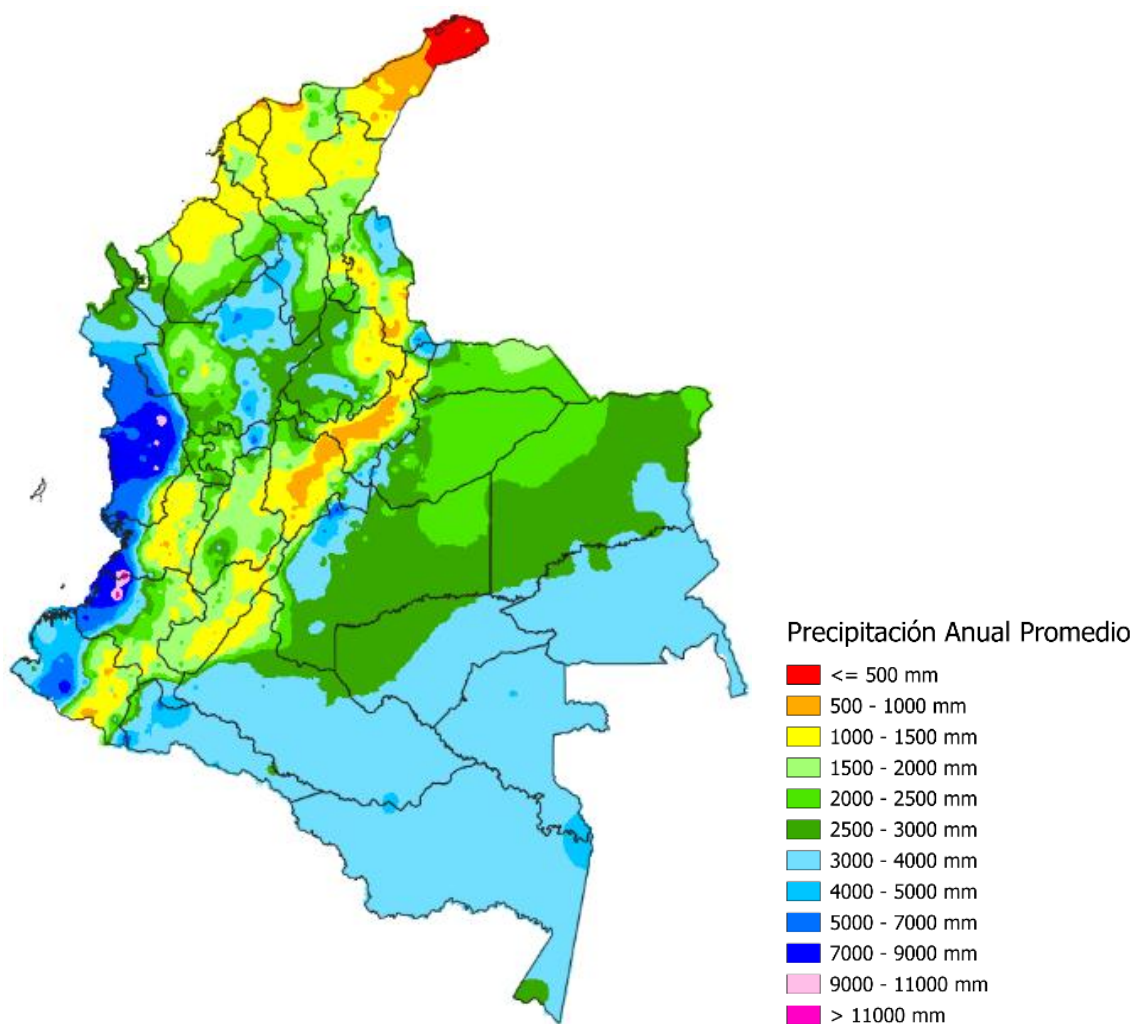
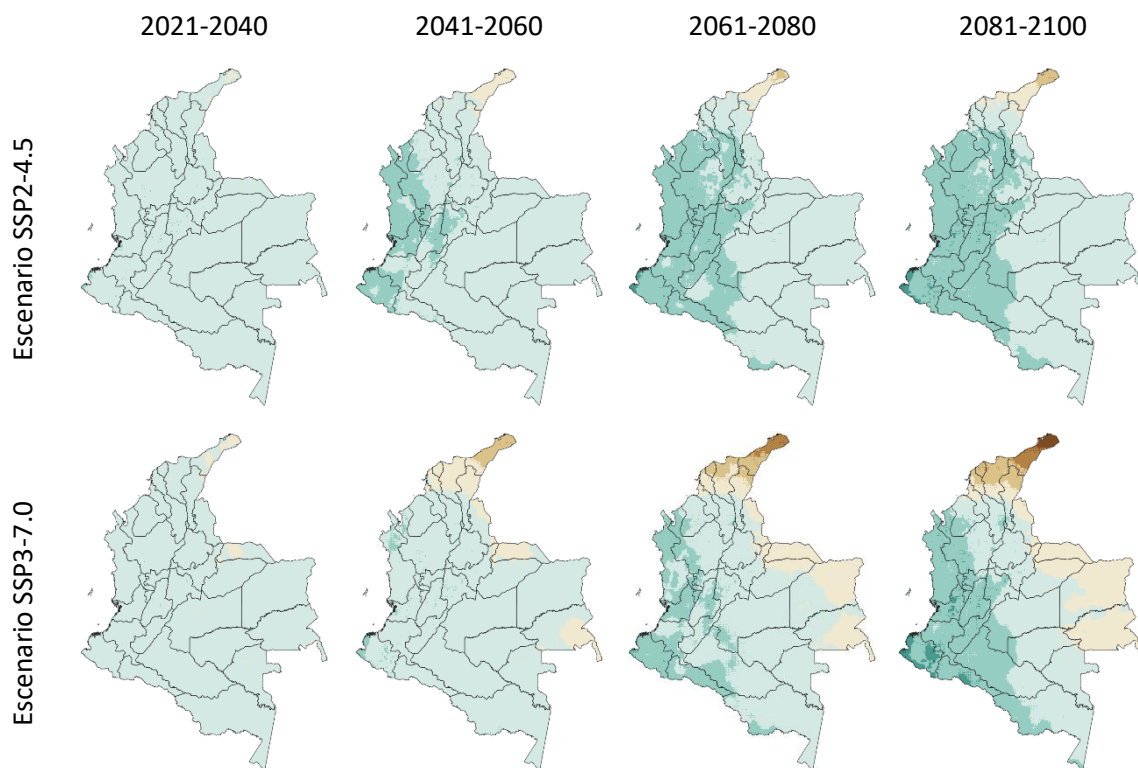


Figura 9. Distribución espacial de la precipitación anual (promedio multianual del período 1991-2020), según registros de estaciones climatológicas. Fuente: Elaboración propia

Los cambios que habría en la precipitación anual se muestran en la Figura . Es posible ver que, bajo ambos escenarios (SSP2-4.5 y SSP3-7.0), se presentarían aumentos en la mayor parte del territorio nacional.

La región Andina presentaría aumentos del 5 al 20% del volumen anual, y con aumentos del 20-30% en algunas pequeñas áreas en el eje cafetero y en los departamentos de Tolima y Cundinamarca hacia finales del siglo XXI.

Sobre la región del Caribe se tendrían aumentos del 5-10% en el periodo 2021-2040, y a partir del año 2041 en adelante se tendrían disminuciones en la precipitación, especialmente en el departamento de La Guajira, siendo del orden del 5 al 20% bajo el escenario SSP2-4.5 y del 5 al 40% bajo el SSP3-7.0.



Leyenda

- Aumento de más del 40%
- Aumento entre 30% y 40%
- Aumento entre 20% y 30%
- Aumento entre 10% y 20%
- Aumento entre 0% y 10%
- Reducción entre 0% y 10%
- Reducción entre 10% y 20%
- Reducción entre 20% y 30%
- Reducción entre 30% y 40%
- Reducción de más del 40%

Figura 10. Porcentaje de cambios en la precipitación anual, en relación con lo observado en 1991-2020 en los escenarios SSP2-4.5 y 3-7.0. Fuente: Elaboración propia.

En la región del Pacífico colombiano también se darían aumentos de la precipitación en ambos escenarios, del orden de 5-20% y con zonas en los departamentos de Nariño y Cauca con incrementos más altos (entre 20 y 30%) para finales del siglo XXI.

La región de la Orinoquia presentaría cambios variados a lo largo del siglo según cada escenario: bajo el SSP2-4.5 se darían aumentos de la precipitación del orden del 5-10%, mientras que bajo el SSP3-7.0 estos incrementos solamente se darían en el centro y occidente de la región; en el resto de la misma se darían reducciones del orden del 5-10%.

La región Amazonia también presentaría incrementos en la precipitación del orden de 5-20%, y teniendo en el departamento de Putumayo zonas con aumentos mayores (del 20-30%) en el periodo 2081-2100 bajo el SSP3-7.0.

Cambios en la temperatura media anual del aire

La distribución de la temperatura media anual del aire en Colombia registrada en el período 1991-2020, que sirve de referencia para ver los cambios que habría hacia el futuro, se presenta en la Figura 11.

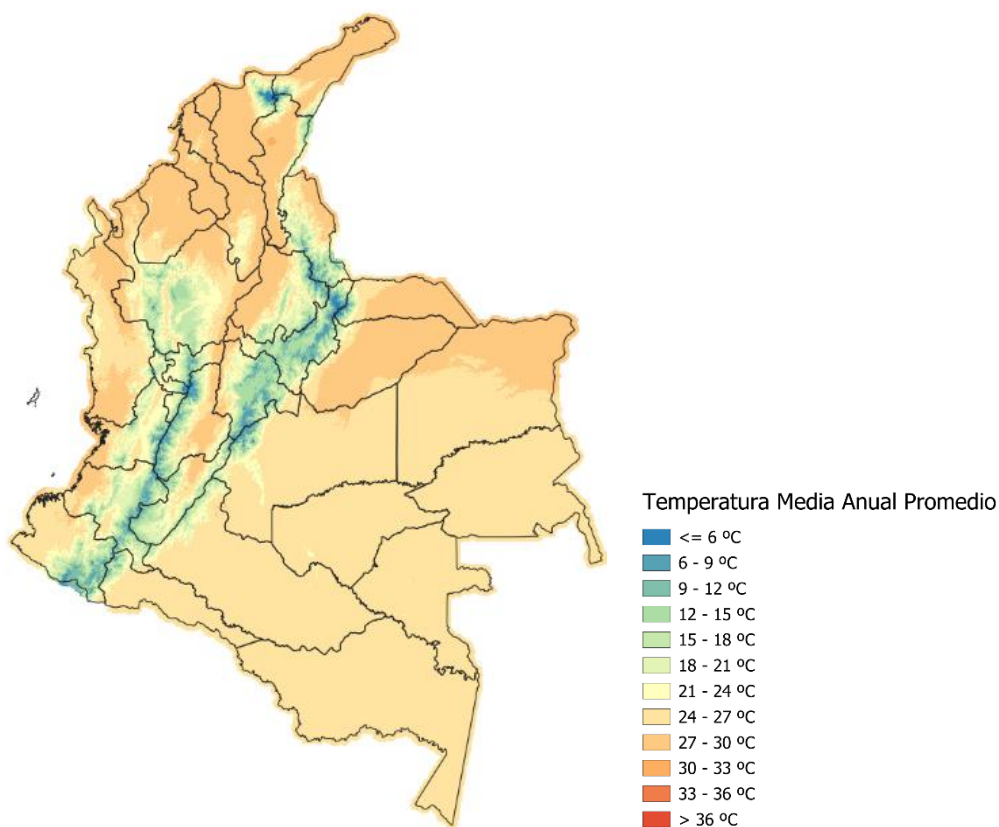


Figura 11. Distribución de la temperatura media anual del aire en Colombia registrada en el período 1991-2020. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a temperatura media anual del aire se refiere (Figura), se presentarían aumentos en todo el país en los dos escenarios, incremento que se hace más marcado en la medida como se avance en el siglo XXI. Igualmente se observa que en algunas regiones el calentamiento es más acentuado.

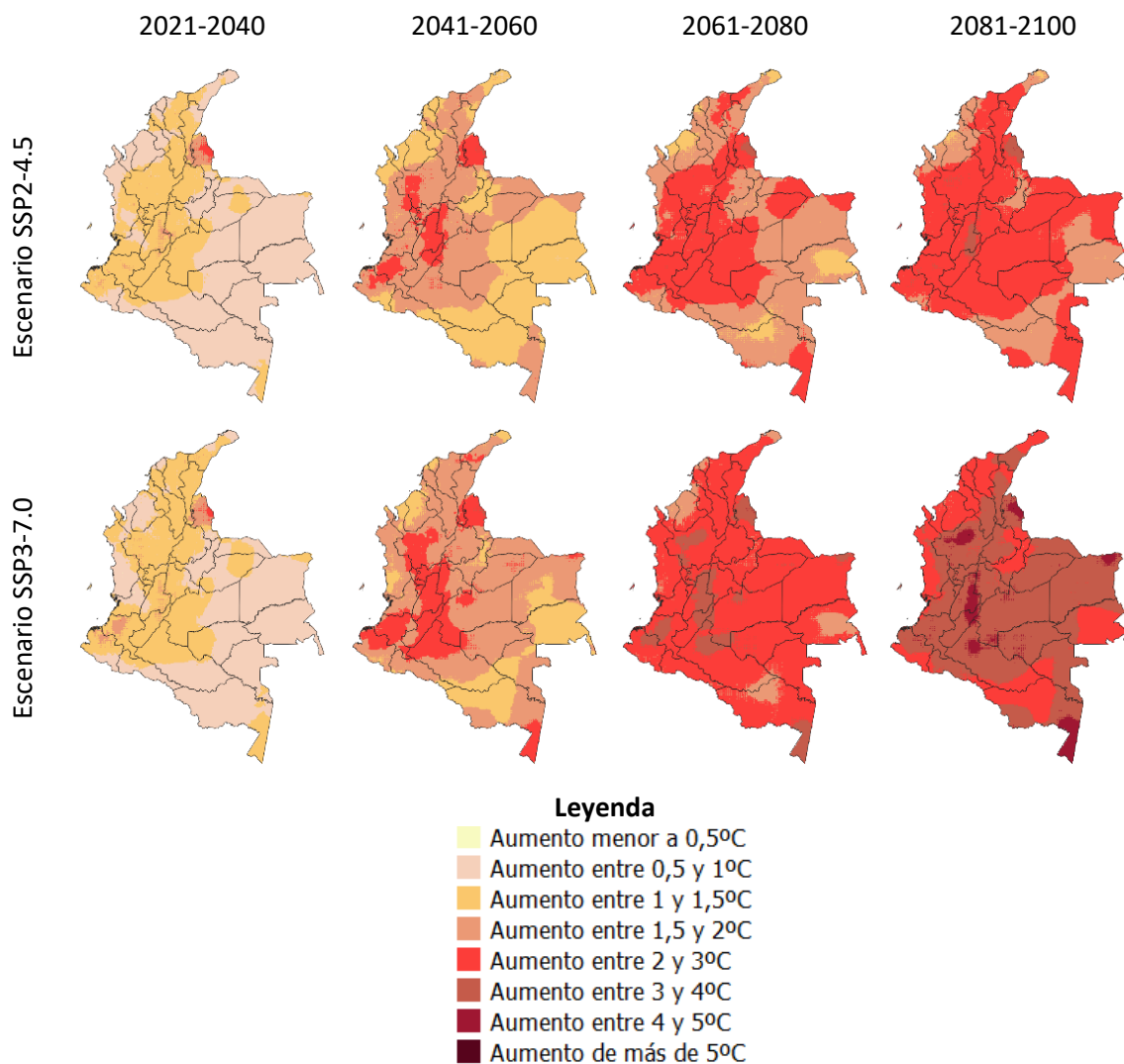


Figura 12. Cambios futuros proyectados en la temperatura media anual (en °C) bajo los escenarios SSP2-4.5 y 3-7.0 para Colombia. Fuente: Elaboración propia.

La región Andina presentaría, para el periodo 2021-2040, aumentos entre 0,5 y 1,5°C en ambos escenarios, con incrementos mayores (entre 1,5 y 3°C) en el Catatumbo. Para el periodo 2041-2060 se tendría una temperatura media entre 1,5-3°C más alta, teniendo los mayores valores en Tolima, norte y centro de Huila, occidente de Cundinamarca y de Antioquia, el eje cafetero y en el Catatumbo. En el periodo 2061-2080 los aumentos de temperatura serían, bajo el SSP2-4.5, del orden de 1,5-3°C, y bajo el SSP3-7.0 entre 1,5-4°C, y teniendo los aumentos más altos (entre 3 y 4°C) en Tolima, Huila, Antioquia y el Catatumbo. Para el periodo 2081-2100 se darían los mayores

aumentos, siendo estos de 2 a 4°C en el escenario SSP2-4.5, y de 3 a 5°C bajo el SSP3-7.0, con los mayores incrementos (de 4-5°C) en Tolima, el norte de Huila y en el Catatumbo.

En la región Amazonia se presentarían, para el periodo 2021-2040, aumentos entre 0,5 y 1,5°C en ambos escenarios; para el periodo 2041-2060 se tendría una temperatura media entre 1,5-3°C más alta, mientras que en el periodo 2061-2080 los aumentos de temperatura serían, bajo el SSP2-4.5, del orden de 1-3°C, y bajo el SSP3-7.0 entre 1,5-4°C. Para el periodo 2081-2100 se darían los mayores aumentos, siendo estos de 2 a 4°C en el escenario SSP2-4.5, y de 3 a 5°C bajo el SSP3-7.0. A lo largo del siglo XXI, los mayores incrementos se darían en el sur del departamento de Amazonas.

Para la región del Pacífico colombiano se darían, en el periodo 2021-2040, aumentos entre 0,5 y 1,5°C en ambos escenarios, con incrementos mayores (entre 1,5 y 2°C) en el departamento del Valle del Cauca. Para el periodo 2041-2060 se tendría una temperatura media entre 1-3°C más alta, teniendo los mayores valores en Valle del Cauca y norte de Nariño. En el periodo 2061-2080 los aumentos de temperatura serían, bajo el SSP2-4.5, del orden de 1,5-3°C, y bajo el SSP3-7.0 entre 2-4°C, y teniendo los aumentos más altos (entre 3 y 4°C) en Valle del Cauca y Nariño. Para el periodo 2081-2100 se darían los mayores aumentos, siendo estos de 1,5 a 4°C en el escenario SSP2-4.5, y de 2 a 4°C bajo el SSP3-7.0, con los mayores incrementos (de 3-4°C) en Cauca, Valle del Cauca, Nariño y en el oriente de Chocó.

En la región Orinoquia se presentarían, para el periodo 2021-2040, aumentos entre 0,5 y 1,5°C en ambos escenarios; para el periodo 2041-2060 se tendría una temperatura media entre 1,5-3°C más alta, mientras que en el periodo 2061-2080 los aumentos de temperatura serían, bajo el SSP2-4.5, del orden de 1,5-3°C, y bajo el SSP3-7.0 entre 2-4°C. Para el periodo 2081-2100 se darían los mayores aumentos, siendo estos de 1,5 a 3°C en el escenario SSP2-4.5, y de 3 a 5°C bajo el SSP3-7.0. A lo largo del siglo XXI, los mayores incrementos se darían en el norte de los departamentos de Meta y Caquetá, y en el nororiente del departamento de Vichada.

Por último, la región Caribe tendría, para el periodo 2021-2040, aumentos entre 0,5 y 1,5°C en ambos escenarios; para el periodo 2041-2060 se tendría una temperatura media entre 1,5-3°C más alta, mientras que en el periodo 2061-2080 los aumentos de temperatura serían, bajo el SSP2-4.5, del orden de 1-3°C, y bajo el SSP3-7.0 entre 1,5-3°C. Para el periodo 2081-2100 se darían los mayores aumentos, siendo estos de 1,5 a 3°C en el escenario SSP2-4.5, y de 2 a 4°C bajo el SSP3-7.0. A lo largo del siglo XXI, los mayores incrementos se darían en el sur de los departamentos de La Guajira, Bolívar y Cesar.

Cambios en el promedio de la temperatura máxima anual del aire

Según los registros del período 1991-2020, el promedio de la temperatura máxima anual del aire se distribuye como se muestra en la Figura 13. Se destacan sectores del valle del río Magdalena (alto y medio) y una vasta área en la región Caribe con los mayores valores de los promedios de las temperaturas máximas.

Durante el siglo XXI, tendrá un incremento espacialmente generalizado (Figura 14), el cual es especialmente diferenciado y se haría más marcado a finales de siglo (en el período 2081-2100 el aumento sería de más de 5°C en comparación con lo observado en el período 1991-2020).

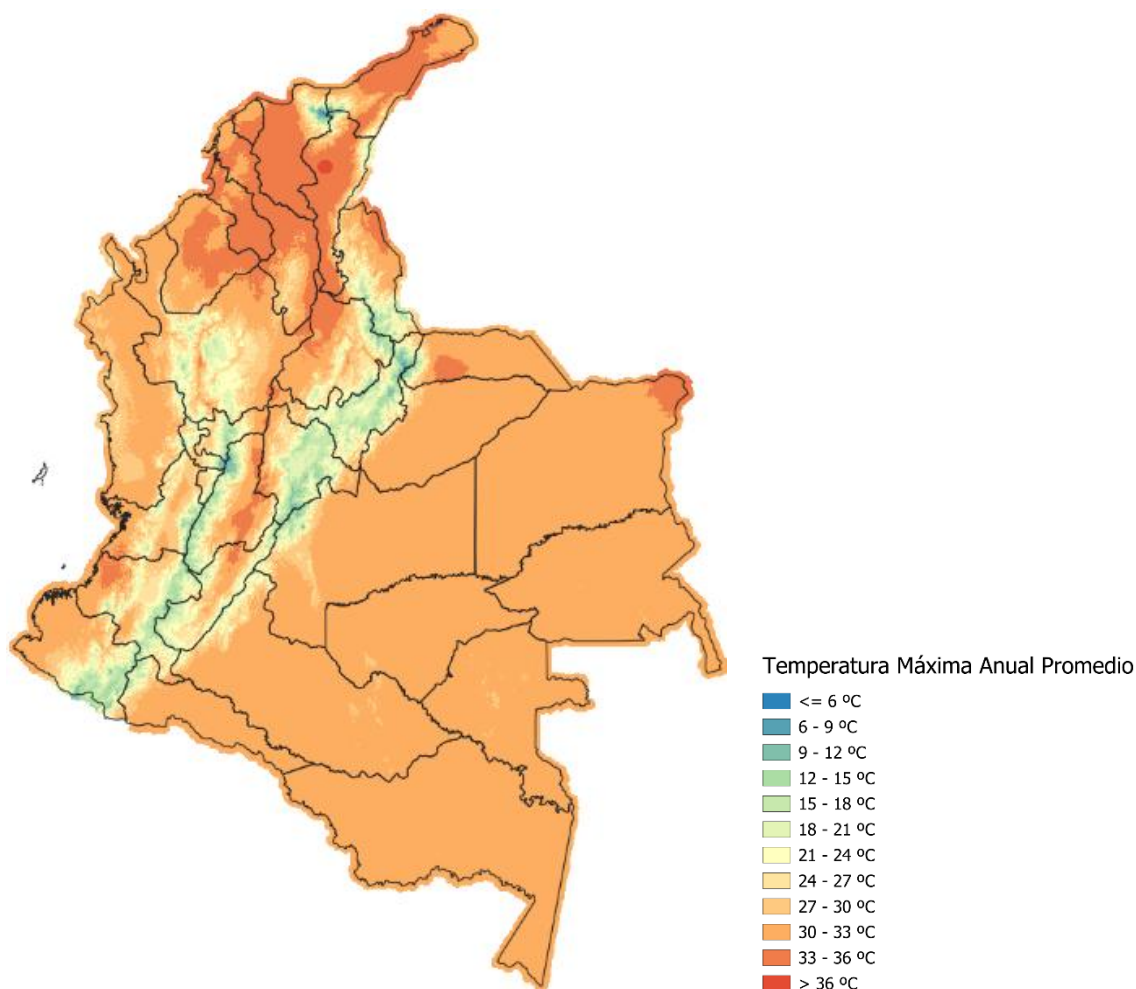


Figura 13. Distribución espacial del promedio de las temperaturas máximas anuales del período 1991-2020

Así, en la región Andina, en el período 2021-2040 y en los dos escenarios, se tendría que este promedio estaría entre 0,5 y 1,5°C por encima de lo registrado en 1991-2020, aunque sobre la región

del Catatumbo se registrarían incrementos de entre 1,5 y 3°C (Figura 14). Hacia mediados del siglo XXI (periodo 2041-2060), en la región Andina, el promedio de los valores máximos anuales de temperatura del aire se incrementaría entre 1-3°C, con el mayor aumento en Huila, Tolima, Cundinamarca, Santander, occidente de Antioquia, sur de Bolívar, el eje cafetero y en el Catatumbo. En el periodo 2061-2080, bajo el SSP2-4.5, los aumentos serían del orden de 1,5-4°C, mientras que bajo el escenario SSP3-7.0 estaría entre 1,5-5°C, con aumentos mayores (entre 3 y 5°C) en Tolima, Huila, el eje cafetero y el Catatumbo. Durante el periodo 2081-2100 (finales del siglo), el aumento de los promedios de las temperaturas máximas alcanzaría valores entre 2 a 4°C en el escenario SSP2-4.5, y de 3 a 5°C bajo el SSP3-7.0, con los mayores incrementos (de 4-5°C) en Tolima, Huila, el eje cafetero y en el Catatumbo.

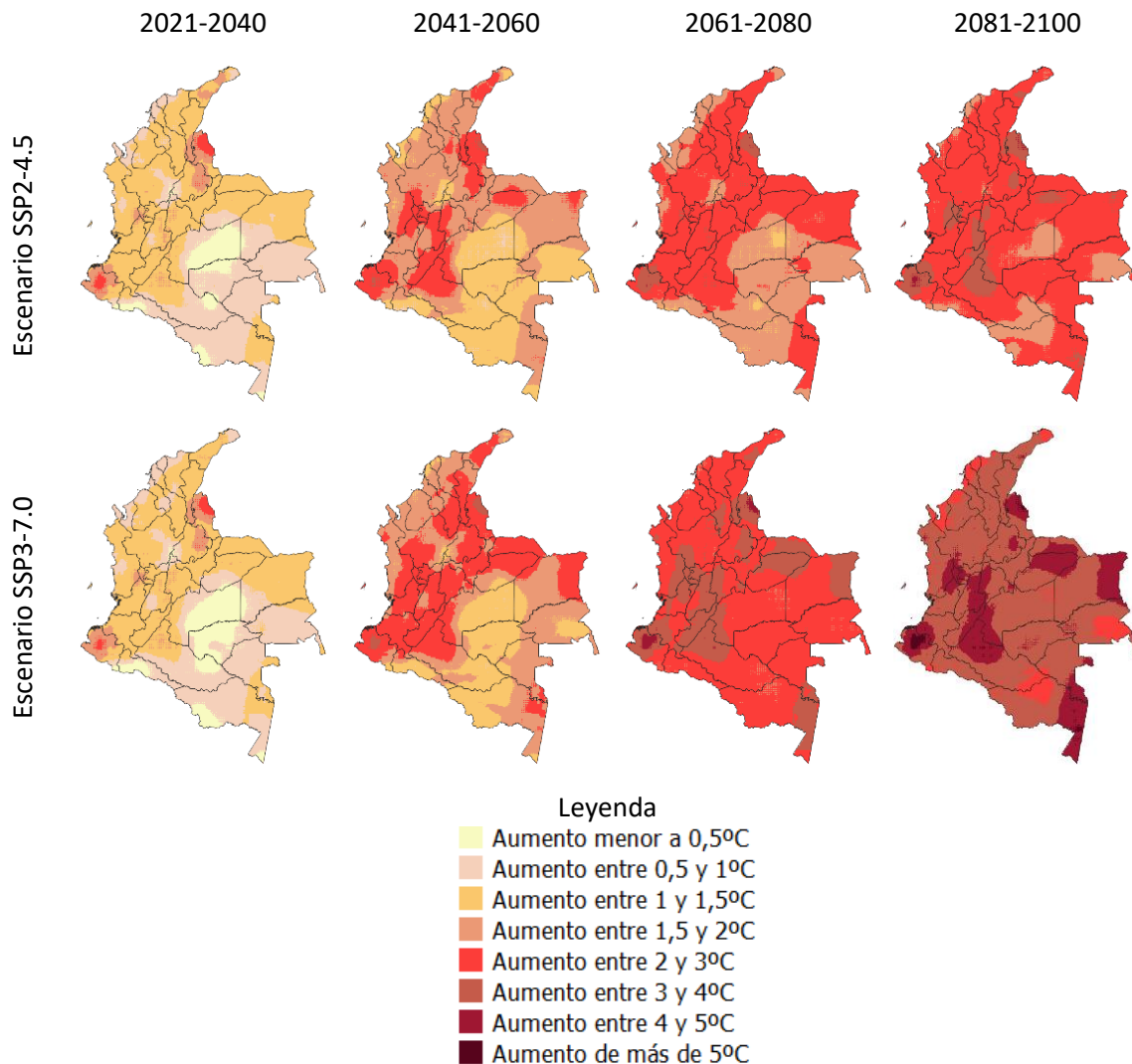


Figura 14. Cambios en el promedio de las temperaturas máximas anuales (en °C) en diferentes períodos del siglo XXI bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. Fuente: Elaboración propia.

En la región Caribe, para el periodo 2021-2040, habría aumentos de los promedios de las temperaturas máxima entre 0,5 y 1,5°C, en ambos escenarios; para el periodo 2041-2060 se tendría una temperatura máxima entre 1-3°C más alta, mientras que en el periodo 2061-2080 los aumentos de temperatura serían, bajo el SSP2-4.5, del orden de 1,5-3°C, y bajo el SSP3-7.0 entre 2-4°C. Para el periodo 2081-2100 se darían los mayores aumentos, siendo estos de 1,5 a 4°C en el escenario SSP2-4.5, y de 3 a 4°C bajo el SSP3-7.0. A lo largo del siglo XXI, los mayores incrementos se darían en el departamento de La Guajira.

En la región de la Amazonia colombiana, para el periodo 2021-2040, se presentarían aumentos entre 0,3 y 1,5°C en ambos escenarios; para el periodo 2041-2060 se tendrían promedios de la temperatura máxima entre 1-3°C más alta, mientras que en el periodo 2061-2080 los aumentos de esta variable serían del orden de 1-3°C, bajo el SSP2-4.5, y de 1,5-4°C, bajo el SSP3-7.0. Para el periodo 2081-2100 habría los mayores aumentos, siendo éstos de 1,5 a 4°C en el escenario SSP2-4.5, y de 3 a 5°C bajo el SSP3-7.0. A lo largo del siglo XXI, los mayores incrementos ocurrirían en el oriente de los departamentos de Amazonas y Vaupés.

En Pacífico colombiano, para el periodo 2021-2040, se presentarían aumentos entre 0,5 y 3°C en ambos escenarios; para el periodo 2041-2060 se tendrían promedios de la temperatura máxima entre 1,5-4°C más alta, mientras que en el periodo 2061-2080 los aumentos de estos promedio serían del orden de 1,5-4°C, , bajo el SSP2-4.5, y entre 2-5°C, bajo el SSP3-7.0. Para el periodo 2081-2100 se darían los mayores aumentos, siendo éstos de 2 a 4°C en el escenario SSP2-4.5, y de 3 a 6°C bajo el SSP3-7.0. A lo largo del siglo XXI, los mayores incrementos se darían en el departamento de Nariño.

Sobre la región de la Orinoquia, en el periodo 2021-2040, los promedios de los máximos anuales de temperatura del aire tendrían aumentos entre 0,3 y 1,5°C en ambos escenarios, con incrementos mayores (entre 1 y 1,5°C) en los departamentos de Arauca, Casanare y Vichada. Para el periodo 2041-2060 se tendrían promedios de la temperatura máxima anual entre 1-3°C más altos, que los de 1991-2020, con mayores valores en Arauca y Casanare y en el oriente de Vichada. En el periodo 2061-2080 los aumentos de temperatura serían, bajo el SSP2-4.5, estarían en el umbral de 1-3°C, y, bajo el SSP3-7.0, entre 2-4°C, con los aumentos más altos (entre 3 y 4°C) en las mismas zonas del periodo anterior. Y en 2081-2100 se darían los mayores aumentos, siendo éstos de 1,5 a 3°C en el escenario SSP2-4.5, y de 2 a 5°C bajo el SSP3-7.0, con los mayores incrementos (de 4-5°C) en Arauca y Casanare y en el oriente de Vichada.

Cambios en el promedio de la temperatura mínima anual del aire

La distribución espacial de los promedios de las temperaturas mínimas anuales en el período 1991-2020 se presentan en la Figura 15. Las áreas con valores más bajos de los promedios de las temperaturas mínimas se confinan a las áreas más altas de la región Andina, sobre las tres cordilleras y la Sierra Nevada de Santa Marta.

A lo largo del siglo XXI, las temperaturas mínimas serán cada vez más altas, es decir, no bajarán hasta los valores registrados en el período de referencia (Figura 16). Así, en la región Andina presentaría, ya para el periodo 2021-2040, aumentaría os entre 0,5 y 3°C en los dos escenarios, con incrementos mayores (entre 2 y 3°C) en el occidente de Cundinamarca, norte de Tolima y oriente de Caldas. Para el periodo 2041-2060 el promedio de las temperaturas mínimas podrá aumentar entre 1-3°C, con los mayores valores en el norte de Tolima, el centro y occidente de Cundinamarca y el oriente de Caldas y Antioquia. Hacia el 2061-2080 los aumentos de los promedios de la temperatura mínima serían del orden de 1,5-4°C bajo los dos escenarios, siendo mayores (entre 3 y 4°C) en las zonas del periodo anterior bajo el SSP3-7.0. Para el periodo 2081-2100 el aumento sería más marcado, siendo estos de 1,5 a 4°C en el escenario SSP2-4.5, y de 3 a 5°C bajo el SSP3-7.0, con los mayores incrementos (de 4-5°C) en el centro y occidente de Cundinamarca, el oriente de Caldas y Antioquia y en el norte de Tolima.

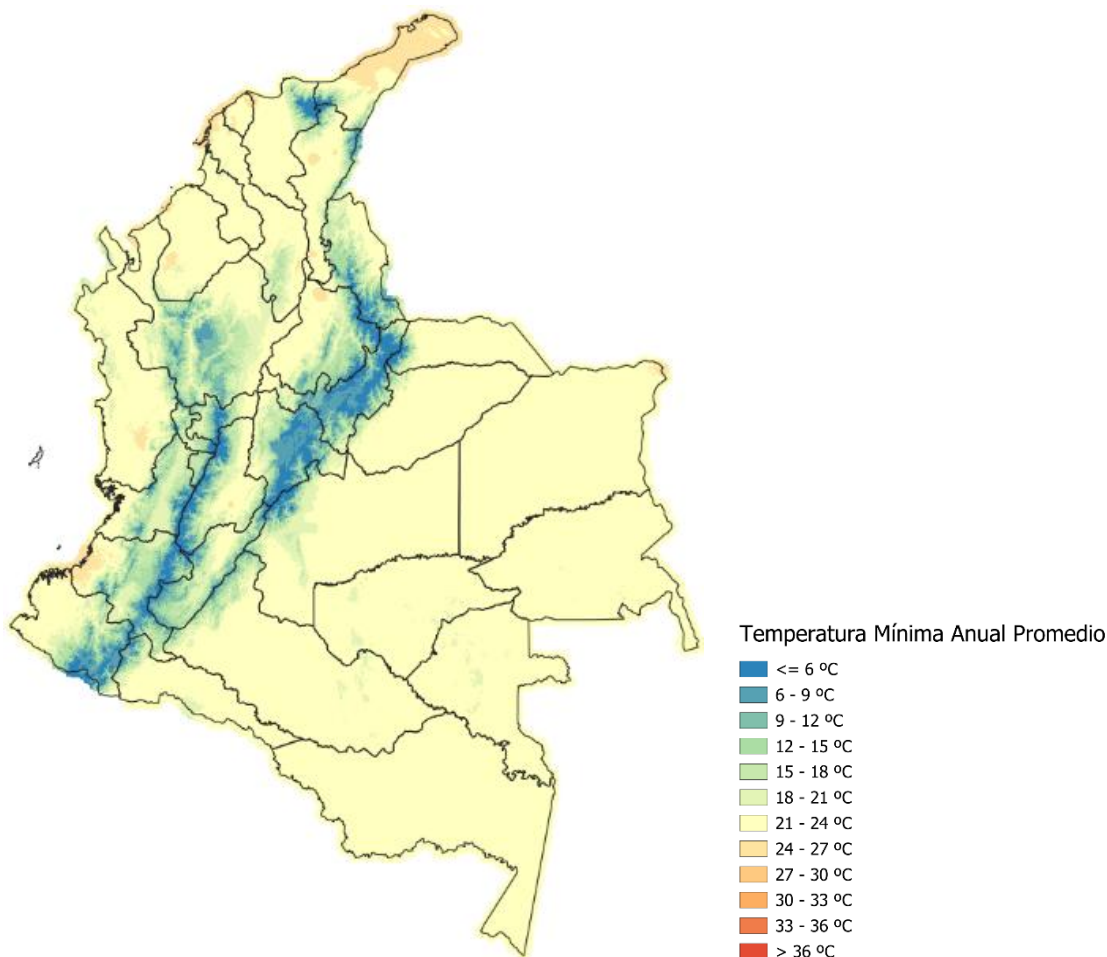


Figura 15. Distribución espacial de los promedios de las temperaturas mínimas anuales en el período 1991-2020. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 16 es posible ver también que para la región Caribe, en el periodo 2021-2040, se tendría aumento de los promedios de temperatura mínima entre 0,2 y 2°C en los dos escenarios; para el periodo 2041-2060 (mediados de siglo XXI) y el período 2061-2080 el aumento de estos estaría entre 1-3°C bajo ambos escenarios. Para el periodo 2081-2100 (finales de siglo) se tendría el mayor aumento, siendo estos de 1 a 3°C en el escenario SSP2-4.5, y de 1,5 a 4°C bajo el SSP3-7.0. A lo largo del siglo XXI, los mayores incrementos se darían en el norte de los departamentos de Bolívar y Cesar.

Para el Pacífico colombiano, en el periodo 2021-2040, los promedios de la temperatura mínima se habrían incrementado en 0,5-1,5°C en los dos escenarios analizados, con aumento más marcado

(entre 1 y 1,5°C) en el departamento de Nariño; para el periodo 2041-2060, los valores promedio de temperatura mínima estarían entre 1-2°C más altos que lo observado en 1991-2020, con el mayor aumento en Valle del Cauca, Nariño y Chocó. En el periodo 2061-2080, este aumento sería del orden de 1,5-3°C bajo ambos escenarios, con los aumentos más altos (entre 2 y 3°C) en los mismos departamentos del periodo anterior. Hacia finales del siglo XXI, periodo 2081-2100, se tendría el mayor aumento de los valores promedio de temperaturas mínimas, siendo de 1,5 a 3°C en el escenario SSP2-4.5, y de 2 a 4°C bajo el SSP3-7.0; las zonas con el mayor aumento (de 3-4°C) se localizarían en Nariño, Valle del Cauca y en el oriente de Chocó.

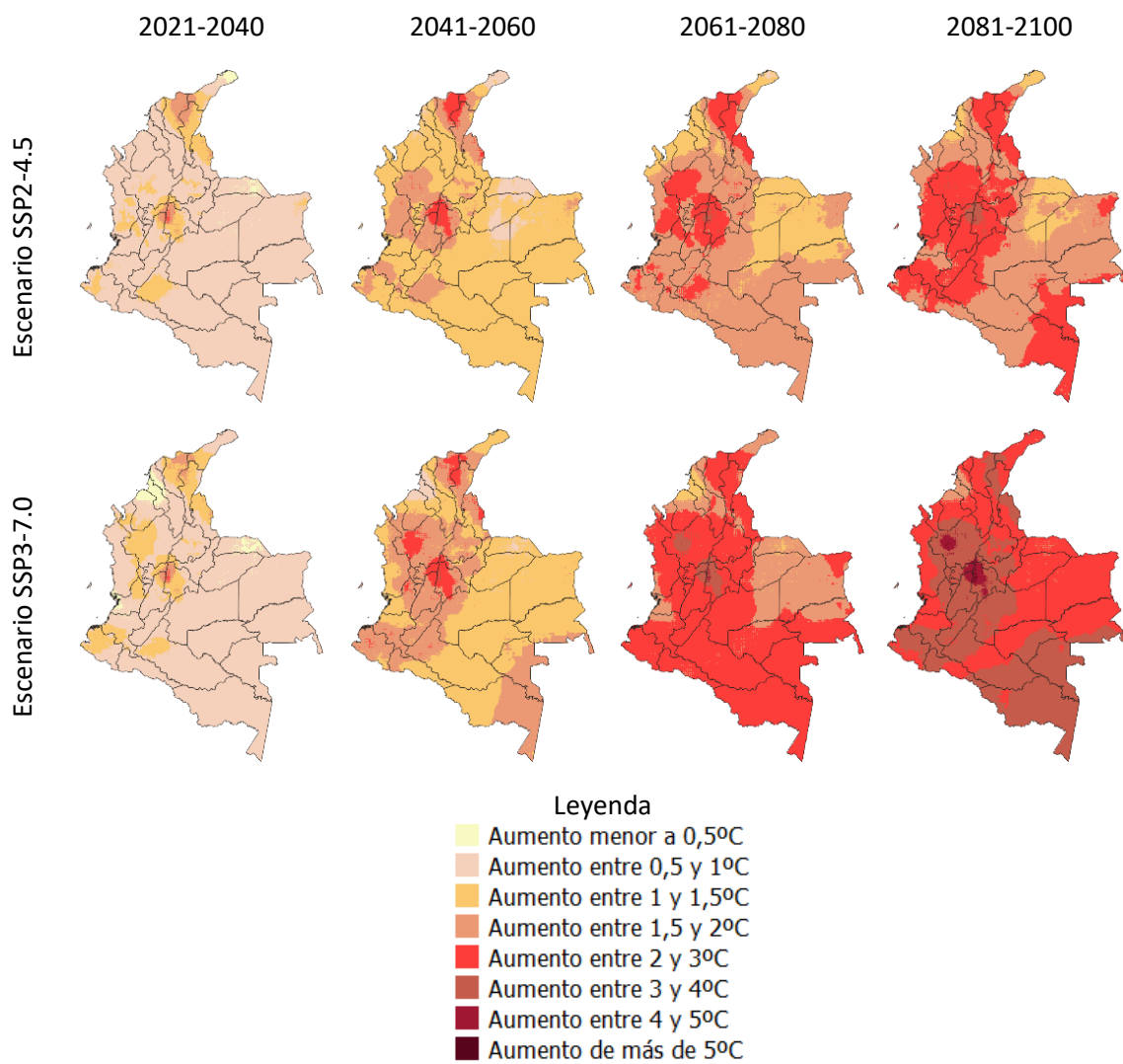


Figura 16. Cambios en el promedio de las temperaturas mínimas anuales (en °C) en diferentes períodos del siglo XXI bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. Fuente: Elaboración propia.

En la región de la Orinoquia, en el periodo 2021-2040, los promedios de temperatura mínima presentarían aumento entre 0,3 y 1°C en los dos escenarios; para el periodo 2041-2060, este aumento estaría entre 0,5-1,5°C, mientras que en el periodo 2061-2080 sería del orden de 1-2°C, bajo el escenario SSP2-4.5 y entre 1,5-3°C bajo el SSP3-7.0. Para el periodo 2081-2100 el aumento del promedio de las temperaturas mínimas sería entre 1 y 3°C en el escenario SSP2-4.5, y de 2-4°C bajo el SSP3-7.0. Los mayores aumentos se localizarían en áreas en el occidente del departamento del Meta.

Cambios en el promedio de la humedad relativa

En la Figura 17 se muestra la distribución espacial del promedio anual de humedad relativa estimada a partir de los registros del período 1991-2020. Se destacan la región del Pacífico y la de la Amazonia como las más húmedas, en tanto que la más seca se ubica en La Guajira y Cesar, en el alto Magdalena (especialmente sobre el área semiárida de La Tatacoa) y en un núcleo correspondiente a la cuenca del río Chicamocha.

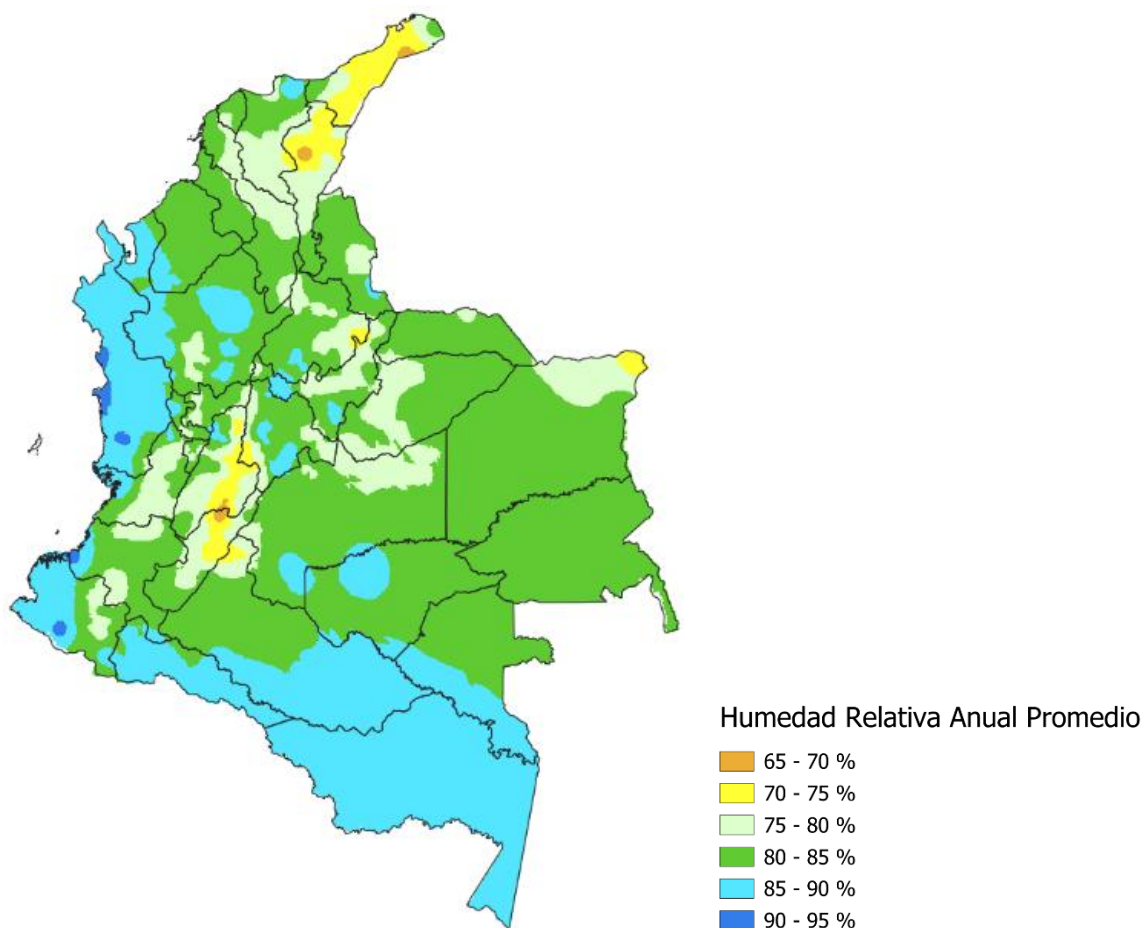


Figura 17. Distribución espacial del promedio anual de humedad relativa en el período 1991-2020. Fuente: *Elaboración propia*

Los cambios estimados al comparar valores promedio de humedad relativa en períodos futuros, en dos escenarios (SSP2-4.5 y SSP3-7.0), con los observados en el período 1991-2020 se presentan en la Figura 18. En una mirada general, a lo largo del siglo XXI el cambio se expresa mayormente en reducciones que no sobrepasan el 7%, aunque ligeros incrementos ocurrirían en la primera mitad del siglo, bajo el escenario SSP2-4.5, en sectores del Pacífico colombiano

2021-2040

2041-2060

2061-2080

2081-2100

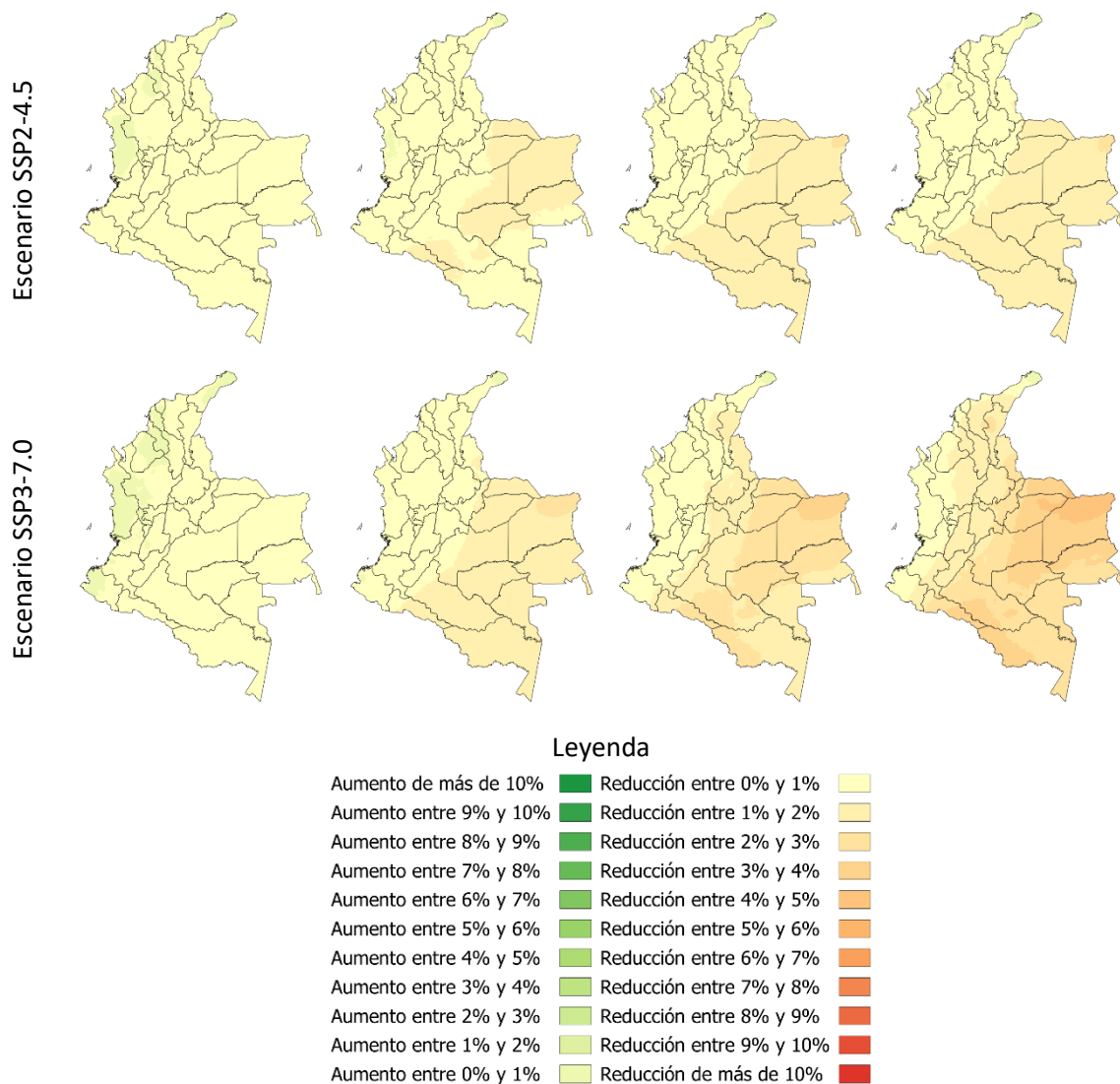


Figura 9. Cambios en el promedio anual de humedad relativa (%) en diferentes períodos del siglo XXI bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 18 se infiere que la región Andina presentaría reducción del promedio anual de humedad relativa entre el 1-2% a lo largo del siglo XXI, mientras que en la Amazonia y en la Orinoquia la disminución sería un tanto mayor (alrededor de 2% a comienzos de siglo hasta alcanzar 7% a finales del siglo bajo el SSP3-7.0). Para la región Caribe los cambios relativamente pequeños (alrededor de 1-2%) con disminución generalizada, aunque con ligeros aumentos en núcleos localizados en Sucre, Córdoba y hacia el norte de Bolívar en el período 2021-2040; sobre el norte de La Guajira, desde mediados de siglo se tendría ligero aumento de la humedad relativa.

Cambios en el promedio de la radiación solar incidente en la superficie

La distribución espacial de los promedios anuales de radiación solar se presenta en la Figura 19. Se destacan la región Caribe, en particular La Guajira, con los mayores valores de esta variable.

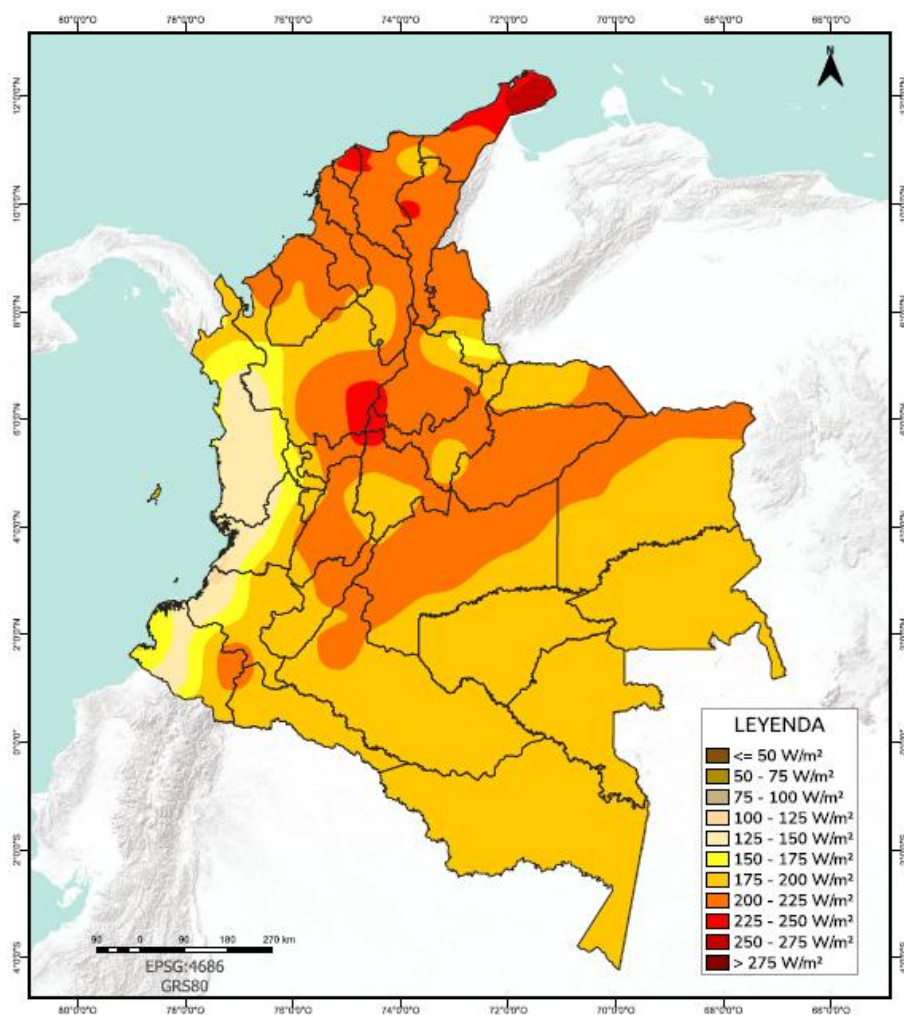


Figura 19. Distribución espacial del promedio anual de radiación solar (W/m²) en el período 1991-2020.

Fuente: Elaboración propia

Los cambios que habría en el promedio anual de radiación solar presentados en la Figura muestran que, en general, se presentarían aumentos en la mayor parte del territorio nacional, con excepción de algunos sectores en la región Caribe en donde disminuiría ligeramente desde mediados del siglo XXI.

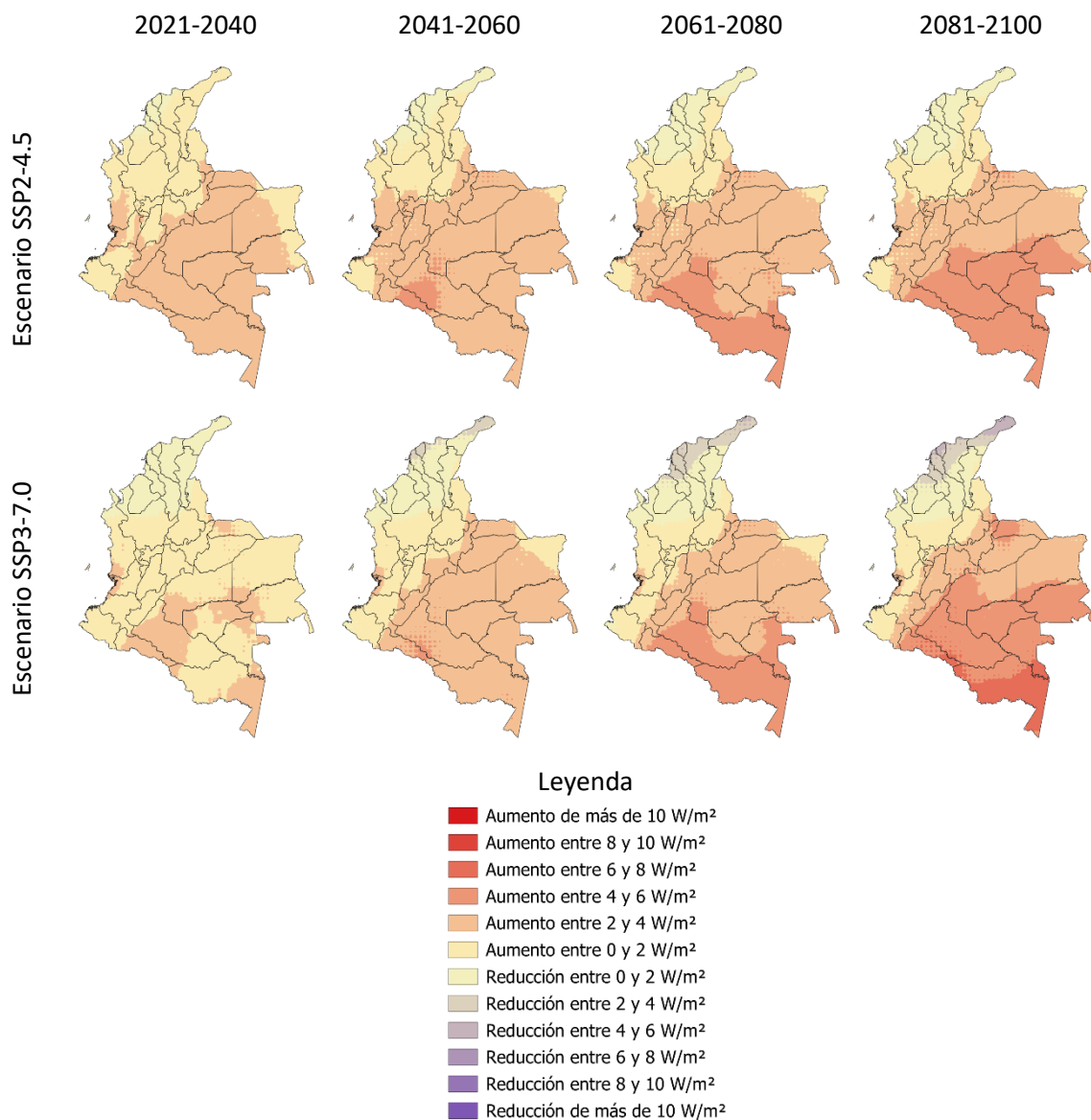


Figura 20. Cambios en el promedio anual de radiación solar (W/m²) en diferentes periodos del siglo XXI bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. Fuente: Elaboración propia.

La región Andina presentaría aumentos de 2 a 4 W/m², y tendría algunas zonas con reducciones del mismo orden en el norte de Antioquia y el sur de Norte de Santander hacia finales del siglo XXI. La región de la Amazonia presentaría incrementos en la radiación del orden de 2-8 W/m², con el mayor aumento (de 6-10 W/m²) en el periodo 2081-2100 bajo el SSP3-7.0. En la región del Pacífico también se darían aumentos de la radiación en ambos escenarios, del orden de 2-4 W/m², aunque al norte del Chocó podría presentarse disminuciones del mismo orden. La región Orinoquia presentaría

aumentos de radiación del orden del 2-4 W/m² a lo largo del siglo XXI. La región Caribe, por su parte, tendría reducciones de 2-4 W/m² al norte de Bolívar y en Atlántico en el periodo 2021-2040, y a partir del año 2041 en adelante se tendrían disminuciones en la mayor parte de la región, únicamente se tendrían aumentos del mismo orden en el departamento de Cesar a lo largo del siglo.

Cambios en el promedio de la velocidad del viento

La distribución espacial de la velocidad media del viento en el período 1991-2020 en Colombia se muestra en la Figura 21. En la mayor parte del territorio colombiano, el promedio de velocidad del viento está alrededor de los 2 m/s, excepto una franja sobre el Macizo colombiano y la Cordillera central, al suroccidente en la que la velocidad media del viento está entre 5 y 6 m/s; en a franja costera del Caribe y en La Guajira los valores de velocidad media del viento están en el rango de 7-8 m/s.

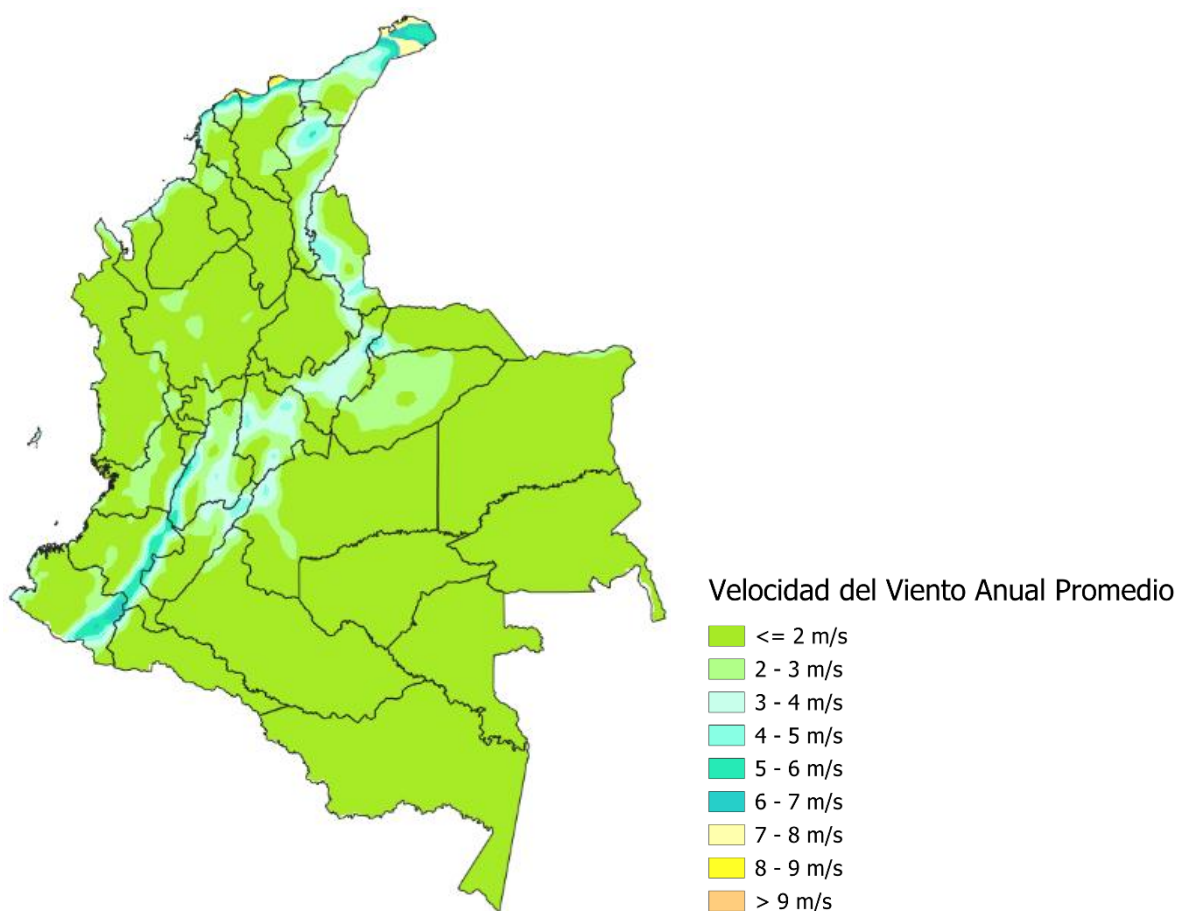
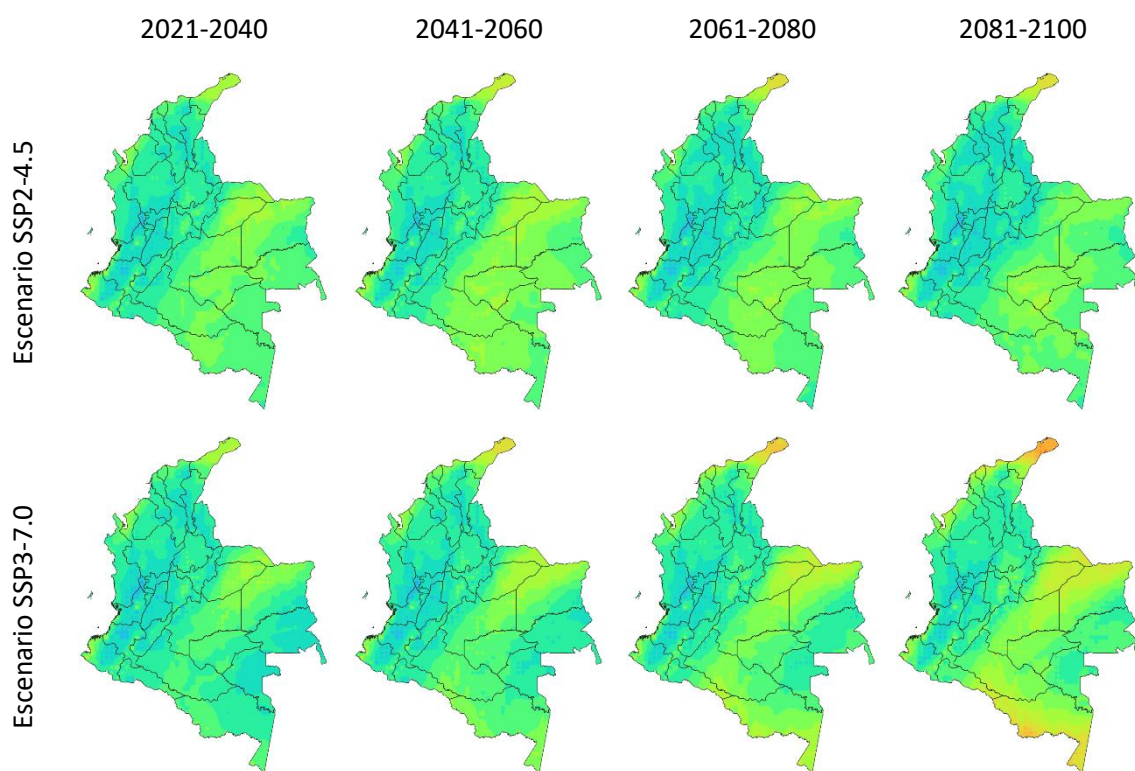


Figura 21. Distribución espacial del promedio velocidad media del viento (m/s) en el período 1991-2020.

Fuente: Elaboración propia

En lo referente a cambios en el promedio de la velocidad del viento en clima futuro comparado con el de 1991-2020, bajo ambos escenarios (SSP2-4.5 y SSP3-7.0), habría ligeros cambios del orden de 1% (de reducción y de aumento), lo que se puede ver en la Figura 22. Leves aumentos de velocidad media del viento se observarían en la región Caribe y en parte de la Orinoquia y la Amazonia en la segunda mitad del siglo XXI (Figura 10). La región Andina presentaría reducciones entre 0,2 y 0,6 m/s, con los mayores valores de este rango (entre 0,4 y 0,6 m/s) en el eje cafetero, el departamento del Tolima y el sur de Antioquia.



Leyenda

Aumento de más de 1 m/s	Reducción entre 0 y 0,1 m/s
Aumento entre 0,9 y 1 m/s	Reducción entre 0,1 y 0,2 m/s
Aumento entre 0,8 y 0,9 m/s	Reducción entre 0,2 y 0,3 m/s
Aumento entre 0,7 y 0,8 m/s	Reducción entre 0,3 y 0,4 m/s
Aumento entre 0,6 y 0,7 m/s	Reducción entre 0,4 y 0,5 m/s
Aumento entre 0,5 y 0,6 m/s	Reducción entre 0,5 y 0,6 m/s
Aumento entre 0,4 y 0,5 m/s	Reducción entre 0,6 y 0,7 m/s
Aumento entre 0,3 y 0,4 m/s	Reducción entre 0,7 y 0,8 m/s
Aumento entre 0,2 y 0,3 m/s	Reducción entre 0,8 y 0,9 m/s
Aumento entre 0,1 y 0,2 m/s	Reducción entre 0,9 y 1 m/s
Aumento entre 0 y 0,1 m/s	Reducción de más de 1 m/s

Figura 10. Cambios en el promedio anual de radiación solar (W/m^2) en diferentes períodos del siglo XXI bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. Fuente: Elaboración propia.

En la región del Pacífico, en ambos escenarios, habría reducciones del orden de 0,2 a 0,6 m/s. La región de la Orinoquia presentaría leves reducciones a lo largo del siglo XXI, del orden de 0,1 a 0,4 m/s, teniendo solamente aumentos del mismo orden en la segunda mitad del siglo XXI bajo el SSP3-7.0 en los departamentos de Vichada, Casanare y Arauca. La región Caribe tendría reducciones en la mayor parte de la región, también del orden de 0,1 a 0,4 m/s, y solamente en el departamento de La Guajira se darían incrementos entre 0,1 y 0,6 m/s en la velocidad del viento a lo largo del siglo.

4. Conclusiones

Los escenarios de cambio climático analizados (SSP2-4.5 y SSP3-7.0) presentan cambios diferenciados en las proyecciones futuras de las 7 variables climáticas, con relación al comportamiento de éstas en el periodo histórico 1991-2020:

- La precipitación presentaría aumentos importantes en la mayor parte del país, siendo éstos de al menos el 5% y llegando a ser hasta del 40% hacia finales del siglo XXI, siendo el sur de la región Pacífica la zona donde se darían los mayores incrementos.
- Las temperaturas media, máxima y mínima aumentarían a lo largo del siglo XXI en todo el territorio nacional, con incrementos entre 0,5 y 5°C para las temperaturas media y mínima, y del orden de 0,5 a 5°C para la temperatura máxima. Los mayores incrementos se presentarían desde mediados de siglo, especialmente en el centro de la región Andina, el sur de la región Pacífica, el Catatumbo y el departamento de Antioquia.
- La humedad relativa tendría cambios que no sobrepasan el 7% en comparación con los valores del periodo histórico 1991-2020. Solamente en el periodo 2021-2040 en las regiones Pacífica y Caribe se tendrían leves aumentos (entre 1-2%), mientras que

en el resto del país y desde el año 2041 en adelante se presentarían reducciones del mismo orden, y siendo levemente superiores (entre 2-7%) en las regiones Orinoquia y Amazonia bajo el escenario SSP3-7.0

- La radiación solar presentaría leves cambios bajo los dos escenarios, dándose aumentos en la mayor parte del país, del orden de 2 a 10 W/m², mientras que las reducciones serían entre 2 y 4 W/m² a lo largo del siglo XXI. La región Amazonia sería la que mayores aumentos presentaría (entre 6-10 W/m²), mientras que la región Caribe sería la que presente las leves reducciones en esta variable.
- La velocidad del viento presentaría ligeros cambios a lo largo del siglo XXI, con reducciones inferiores a 0,6 m/s en la mayor parte de Colombia, y aumentos del mismo orden en las regiones Caribe, Orinoquia y Amazonia en la segunda mitad del siglo.

Referencias

- Escoto-Castillo, A., Peña, L. S., & Delgado, S. G. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios demográficos y urbanos*, 32(3), 669–694. Obtenido de <https://estudiosdemograficosyurbanos.colmex.mx/index.php/edu/article/view/1684/pdf>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937–1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016
- IDEAM. (2017). *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá D.C., Colombia. doi:ISSN: 978-958-8067-95-7
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería. (2015). Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura en Colombia - Estudio Técnico Completo. En *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia*. Bogotá. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022963/022963.htm>
- IPCC. (2014). Anexo II: Glosario. En I. P. IPCC, *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (págs. 127-141). Ginebra, Suiza. Obtenido de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_glossary_ES.pdf
- IPCC. (2021). *Cambio climático 2021: Bases científicas físicas*. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE. UU.: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896
- Pabón-Caicedo, J. D. (2011). *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia - Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Obtenido de <https://sie.car.gov.co/items/3ffbea41-a77a-4f4e-a9fd-b715f8f58049/full>
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., & Nemani, R. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Nature Scientific Data*, 9(262), 6. doi:10.1038/s41597-022-01393-4
- Xu, L., & Wang, A. (2019). Application of the BIAS correction and spatial downscaling algorithm on the temperature extremes from CMIP5 multimodel ensembles in China. *Earth and Space Science*, 6(12), 2508–2524. doi:10.1029/2019EA000995

PARTE III

Análisis de la amenaza por cambio climático en las dimensiones del sector energético (subsectores e infraestructura)



Contratos GGC 1113-2024 y GGC 1949-2025

Suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad Nacional de Colombia con el objeto de “Prestar servicios para apoyar el desarrollo de las actividades priorizadas de mediano y largo plazo contenidas en el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático 2050” y “Prestar Servicios de investigación Científica para la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático PIGCCme 2050 a través de la implementación del Sistema de Información Climática del MME”



III.1 Amenaza por cambio climático en el sector minero

El efecto del cambio climático en los rendimientos hídricos de las subzonas hidrográficas podría ser adverso para la infraestructura como para las actividades del sector minero. Para algunas subzonas hidrográficas los rendimientos hídricos aumentarían, en tanto que, para otras, disminuirían.

La Figura 1 muestra la distribución de la amenaza por cambio climático en segmentos de la cadena productiva de la minería debido al aumento de los rendimientos hídricos en las zonas hidrográficas en las que se tienen títulos mineros y AMEAs. Sobre la base de lo analizado en la Figura 1 es posible señalar que, bajo el escenario SSP3 7.0 y para el periodo 2081-2100, se identifican 79 títulos mineros de exploración en condición de amenaza media por aumento en los rendimientos hídricos. Mientras que en el escenario SSP2 4.5, periodo 2041-2060, se identifican 3 títulos de explotación con amenaza alta por reducción en los rendimientos hídricos de la respectiva subzona hidrográfica.

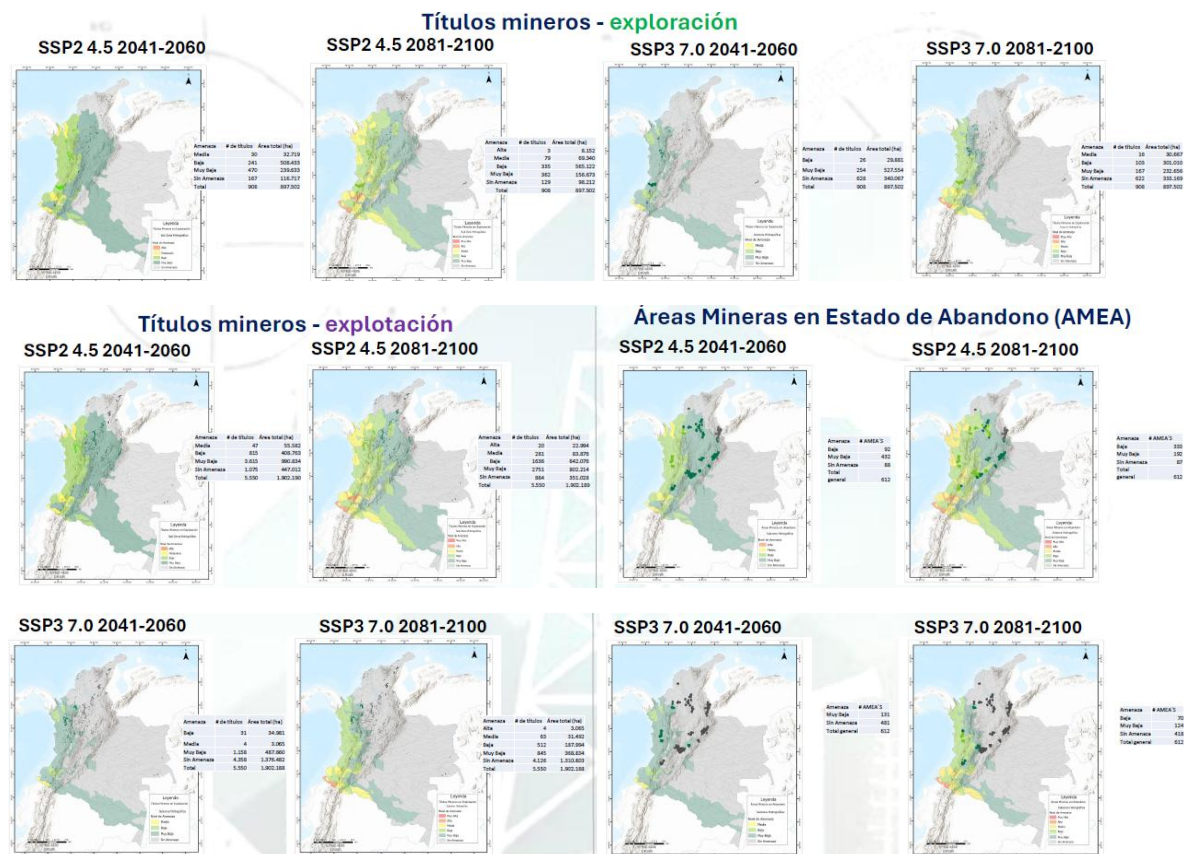


Figura 1. Amenaza por cambio climático en la minería debido al aumento de rendimientos hídricos en subzonas hidrográficas

La Figura 2 muestra la amenaza por cambio climático en el sector de la minería debido a la disminución de los rendimientos hídricos en las cuencas hidrográficas en las que se encuentra títulos mineros o AMEAs

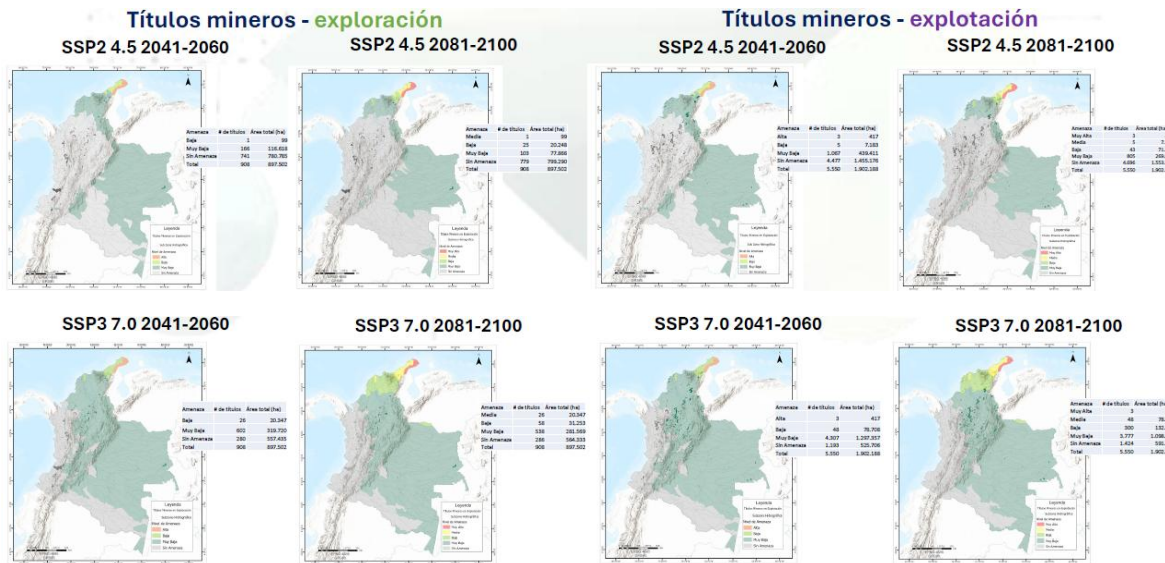


Figura 2. Amenaza por cambio climático en la minería debido a reducción de rendimientos hídricos en subzonas hidrográficas

III.2 Amenaza por cambio climático en el sector de producción de hidrocarburos

La Figura 3 muestra el grado de amenaza por cambio climático de la dimensión hábitat humano del segmento de refinación de la cadena productiva de hidrocarburos, bajo los escenarios climáticos futuros SSP 2-4.5 y SSP 3-7.0. Es posible ver que para los periodos 2041-2060 y 2081-2100, dos refinерías estarían en una condición de amenaza media, mientras que tres refinерías se ubican en zonas de alta amenaza por el aumento de temperatura media (norte del país). Este incremento térmico podría generar efectos adversos, tanto para el funcionamiento del segmento de procesamiento y refinación, como para las diferentes actividades humanas que se desarrollan en este sector.

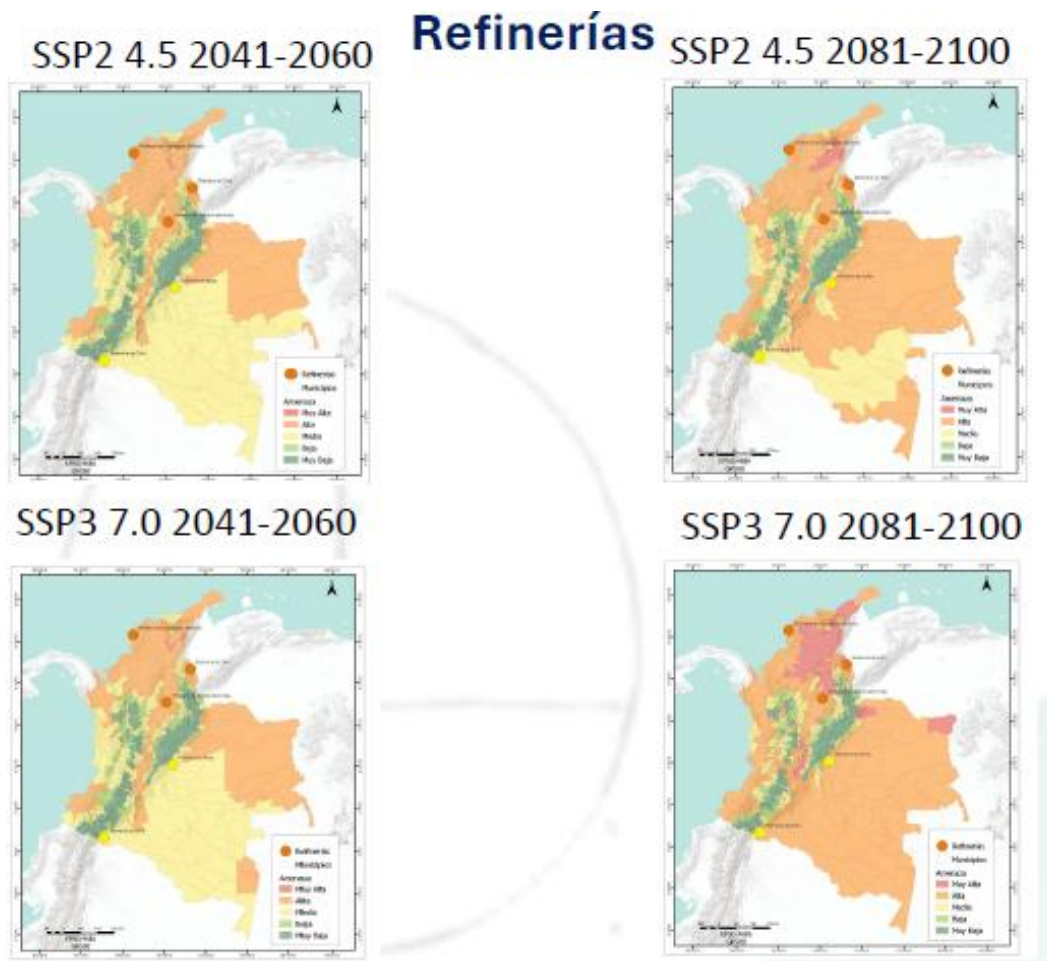


Figura 3. Amenaza por cambio climático en la dimensión de hábitat humano del segmento de refinación de la cadena productiva de hidrocarburos

La amenaza por cambio climático en la dimensión de hábitat humano del segmento de explotación de la cadena productiva de hidrocarburos se presenta en la Figura 4 y en la Tabla 1. La tabla discrimina la cantidad de pozos por tipo de amenaza. En ambos escenarios (SSP2-4.5 y SSP3-7.0), la mayoría de pozos se encontrarían en amenaza alta por aumento de la temperatura media hacia mediados y finales del siglo XXI. Lo cual además representaría un efecto adverso en las condiciones de temperatura en las cuales tanto operarios como personal en general desarrollan actividades para el sector

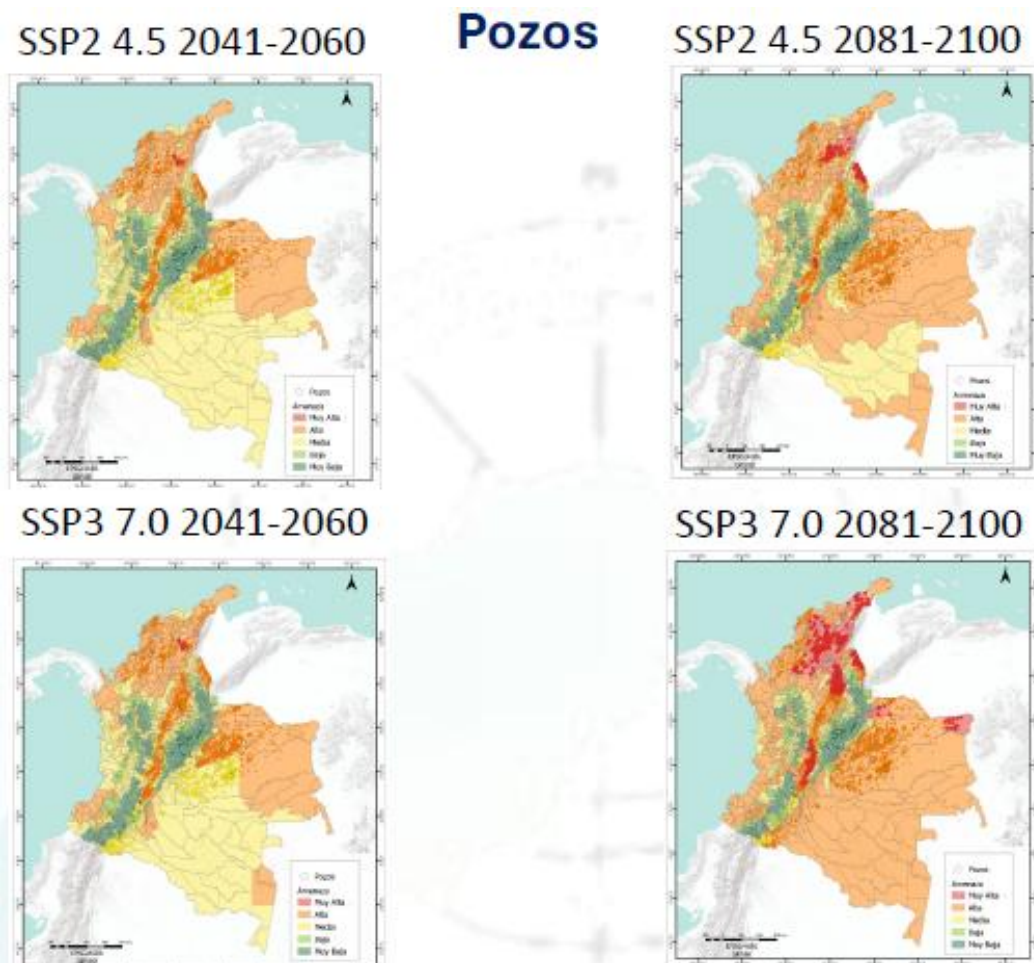


Figura 4. Amenaza por cambio climático en la dimensión de hábitat humano del segmento de producción de la cadena productiva de hidrocarburos

Las variaciones proyectadas en los rendimientos hídricos en las subzonas hidrográficas podrían representar un efecto adverso en las actividades del sector hidrocarburos, particularmente la reducción de recurso hídrico.

La Figura 5 presenta la amenaza en la dimensión de recurso hídrico, por reducción, en el segmento de explotación de la cadena productiva de hidrocarburos bajo los dos escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. A cada mapa lo acompaña una tabla, que representa la cantidad de unidades (pozos o campos) por nivel de amenaza. Por ejemplo, bajo el escenario SSP2 4.5 para el periodo 2041-2060, se identifican 11 pozos con amenaza alta por reducción en los rendimientos hídricos de la respectiva subzona hidrográfica.

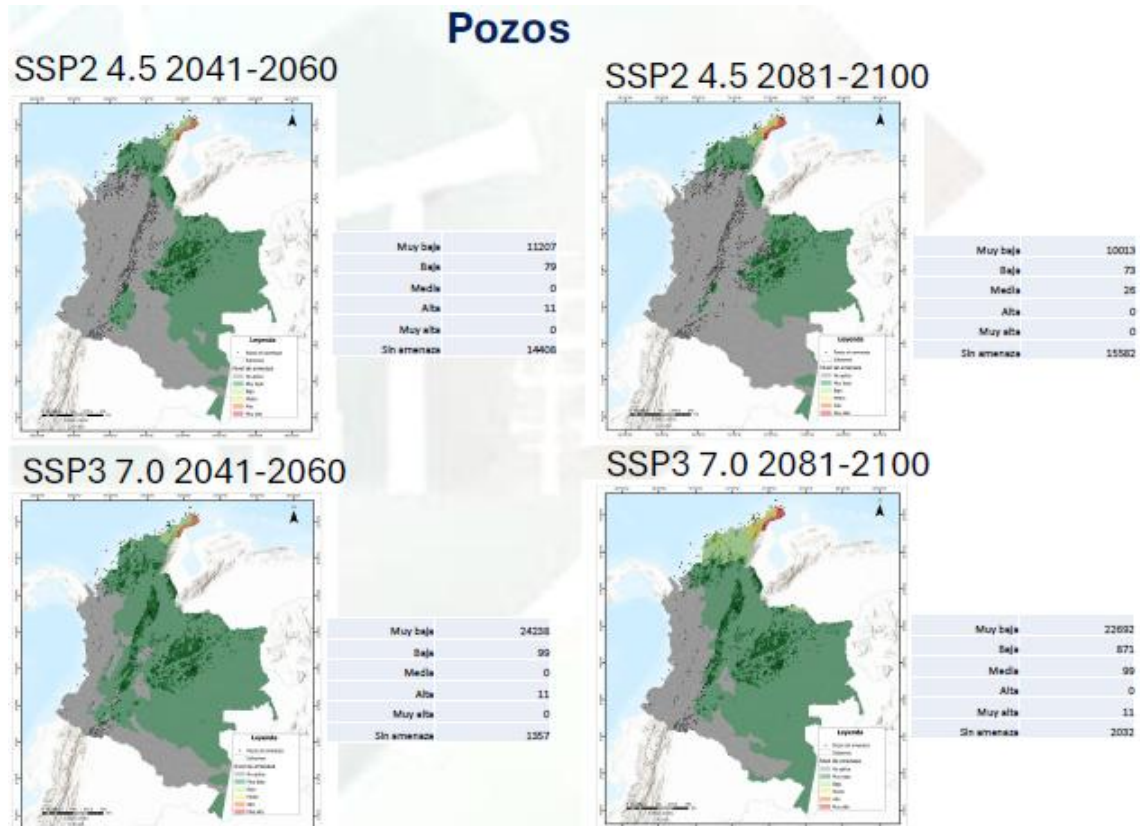


Figura 5. Amenaza por cambio climático en la dimensión de recurso hídrico (disminución) del segmento de explotación de la cadena productiva de hidrocarburos.

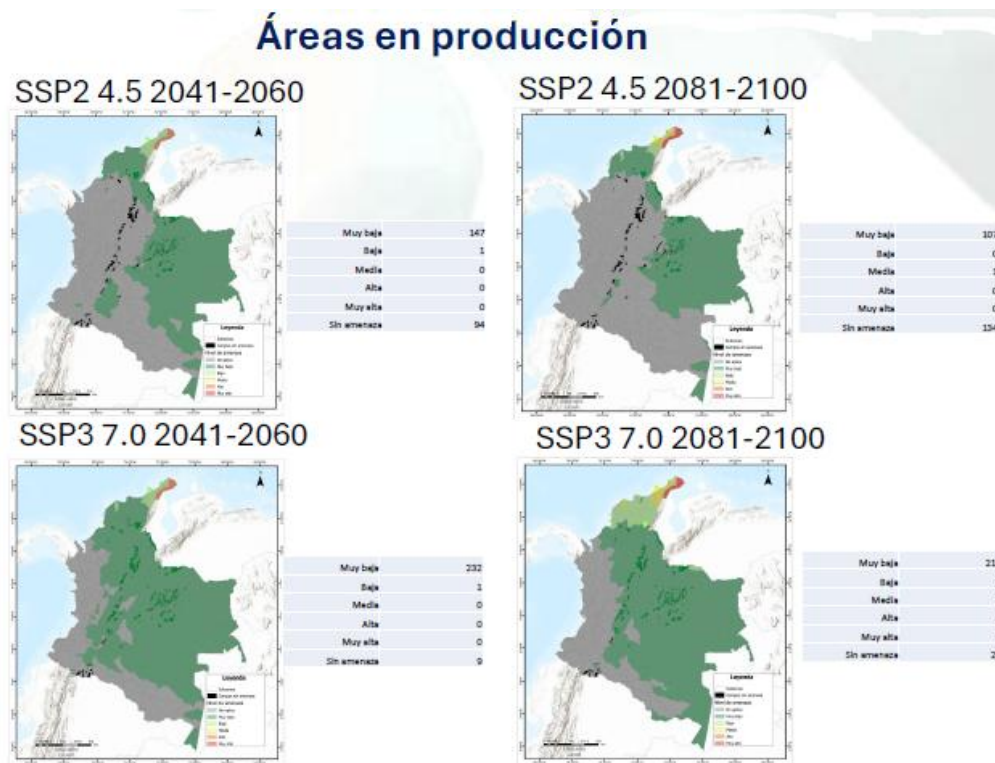


Figura 6. Amenaza por cambio climático en la dimensión de recurso hídrico (disminución) del segmento de explotación de la cadena productiva de hidrocarburos

PARTE IV

Tipificación de la amenaza por cambio climático en las dimensiones territoriales como medio biótico, recurso hídrico, riesgo de desastres e infraestructura)]

IV.1 Amenaza por cambio climático al medio biótico

IV.1.1 Las formaciones vegetales (biomas) en el período 1991-2020 en Colombia

En la distribución de las formaciones vegetales de en Colombia en el período de referencia 1991-2020, es posible identificar 24 formaciones vegetales de Holdridge (Figura IV.1). La formación vegetal que cubre mayor área es la de bosque tropical subhúmedo ocupando el 62% del territorio, seguida de bosque tropical seco con un 9,7%, bosque tropical húmedo (5,8%), bosque andino bajo húmedo (5,2%) y bosque andino bajo subhúmedo (4,3%). (Figura IV.2). Las formaciones vegetales relativas a páramo que se distribuyen en el territorio son super páramo lluvioso, páramo lluvioso, páramo húmedo, subpáramo lluvioso, subpáramo húmedo, bosque alto andino lluvioso, bosque alto andino húmedo, bosque alto andino subhúmedo, bosque andino lluvioso, bosque andino húmedo, bosque andino subhúmedo, bosque andino seco, bosque andino espinoso, matorral desértico, bosque andino bajo lluvioso, bosque andino bajo húmedo, bosque andino bajo subhúmedo, bosque andino bajo seco, bosque tropical lluvioso, bosque tropical húmedo, bosque tropical subhúmedo, bosque tropical seco, bosque tropical muy seco y bosque tropical espinoso.

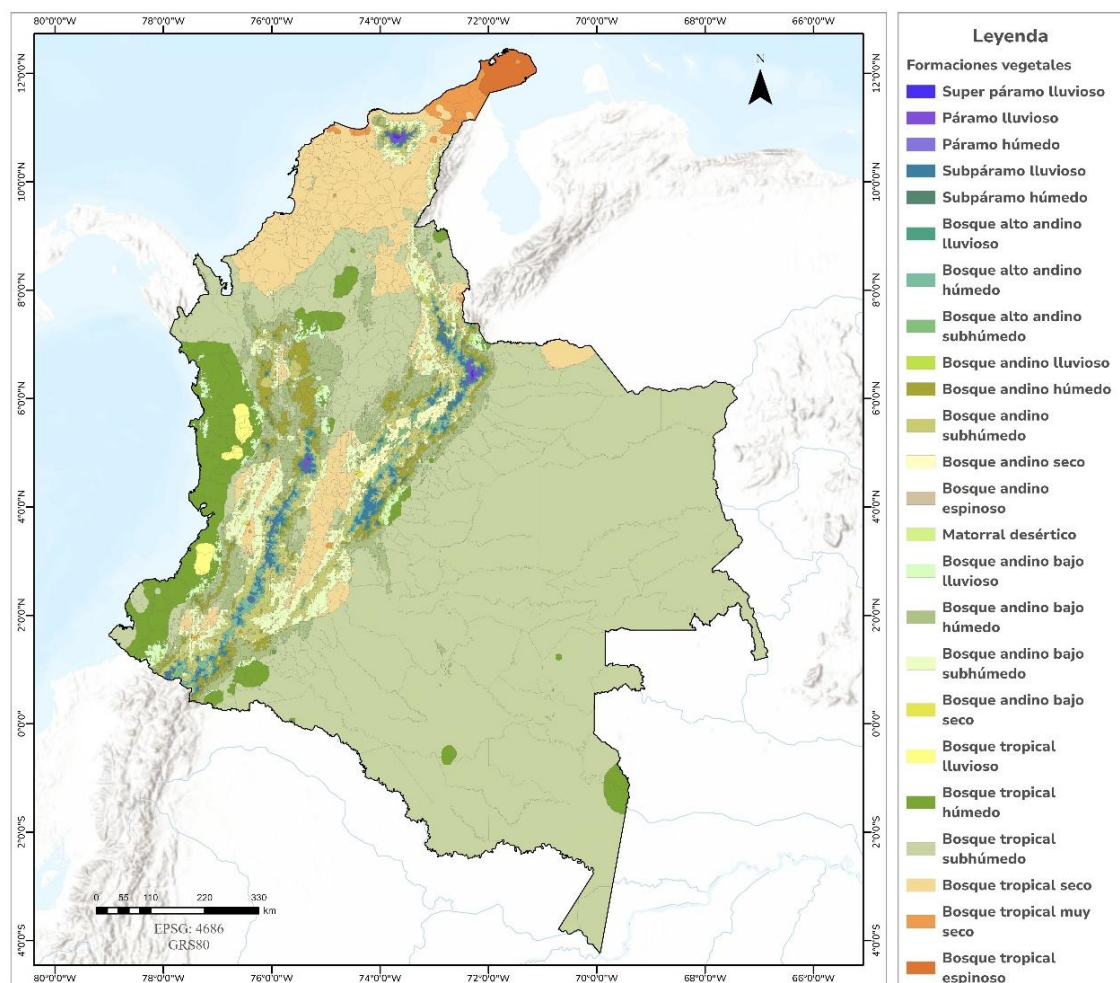


Figura IV.1. Distribuciones espaciales de formaciones vegetales de Holdridge (biomas) de Colombia bajo el clima 1991 – 2020

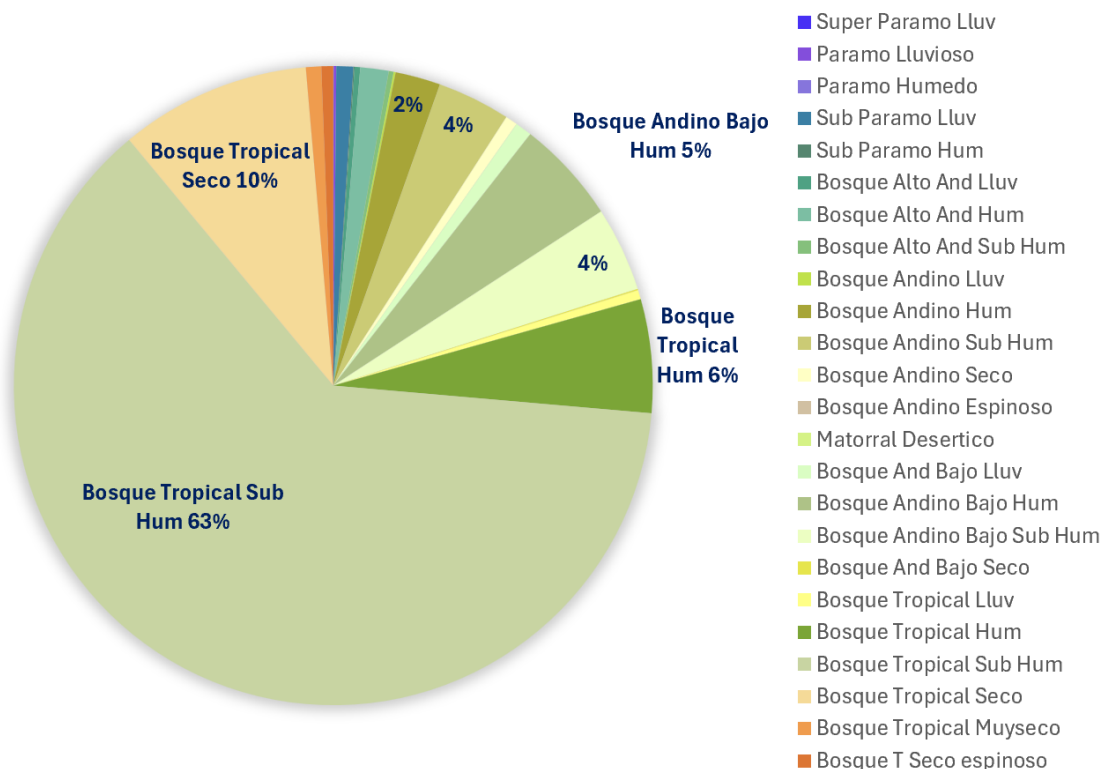


Figura IV.2. Porcentaje de área de las formaciones vegetales de Holdridge (biomas) de Colombia bajo el clima 1991 – 2020

La distribución espacial de las condiciones climáticas ha propiciado el desarrollo del componente biótico característico de Colombia que visto en unidades generales de paisaje bioclimático o bioma tiene el ordenamiento natural que se presenta en la Figura IV.3. Este componente está representado por una alta biodiversidad, dentro del territorio colombiano y se distinguen grandes biomas tales como el Zonobioma Húmedo Tropical, Zonobioma Alternohigrico Tropical, Orobioma de Páramo, Peinobioma, Helobioma, Orobioma subandino, Orobioma Azonal Andino, Orobioma Azonal subandino, Orobioma Andino, Litobioma, Hidrobioma y Halobioma. (IDEAM, 2017, IAvH, 2006).

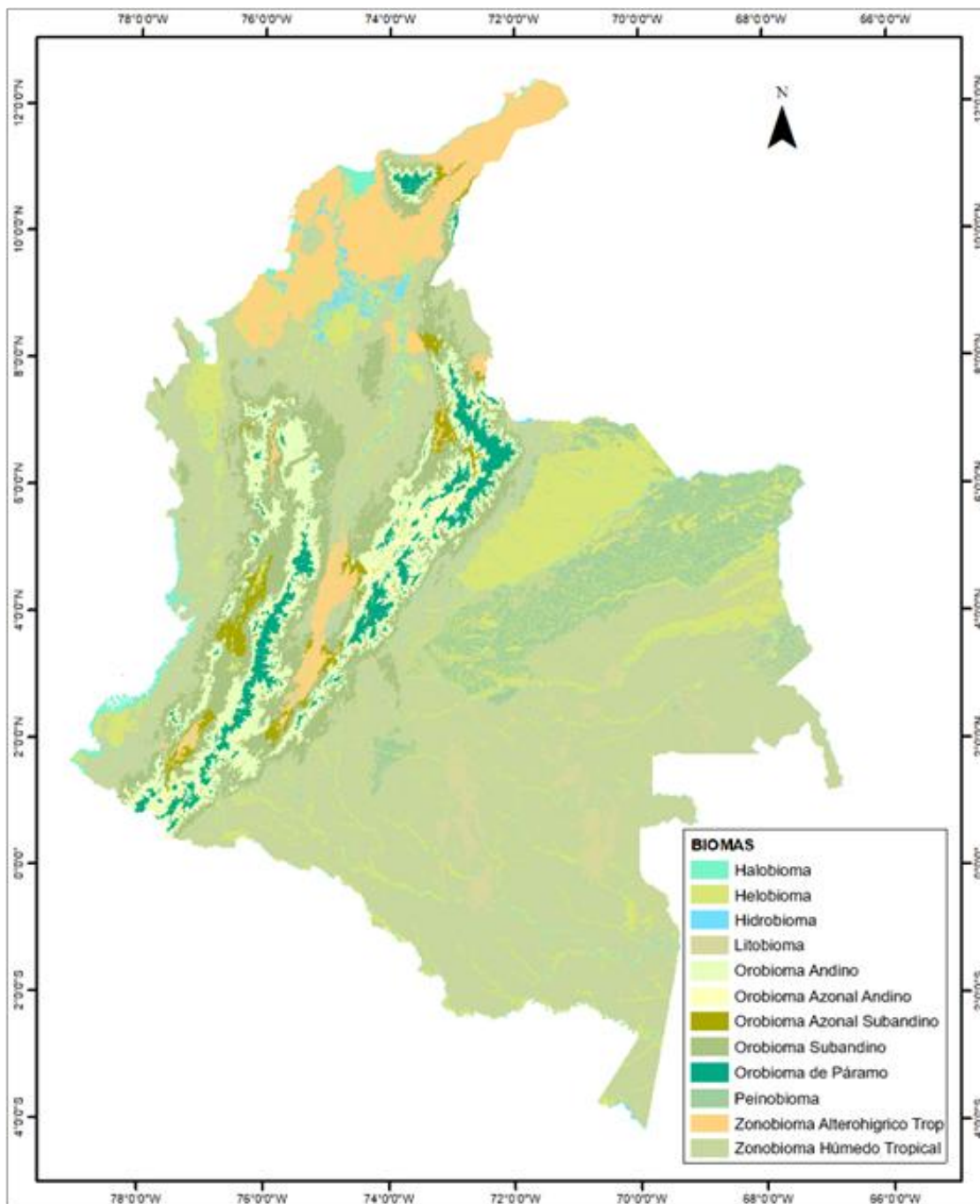


Figura IV.3. Biomas presentes en Colombia. (Elaborado con base en el mapa de ecosistemas de IDEAM- IAvH- INVEMAR- IGAC, 2017)

IV.1.2 Las formaciones vegetales (biomas) en Colombia bajo diferentes escenarios de cambio climático en el siglo XXI (2041-2060 y 2081-2100)

En la Figura IV.4 se presenta la distribución de las formaciones vegetales de Holdridge en Colombia en el período de referencia 1991-2020 y en períodos futuros (2041-2060 y 2081-2100) en dos escenarios (SSP2-4.5 y SSP3-7.9). En ambos escenarios se presenta aumento del área del bosque tipo seco (andino seco, matorral desértico, bosque andino bajo seco, bosque tropical seco y bosque tropical muy seco); este aumento ocurre a costa de la reducción de los bosques húmedos (páramos, bosques altoandinos, bosques andinos). Se observa aumento a lo largo del siglo XXI de bosque tropical lluvioso y bosque tropical húmedo.

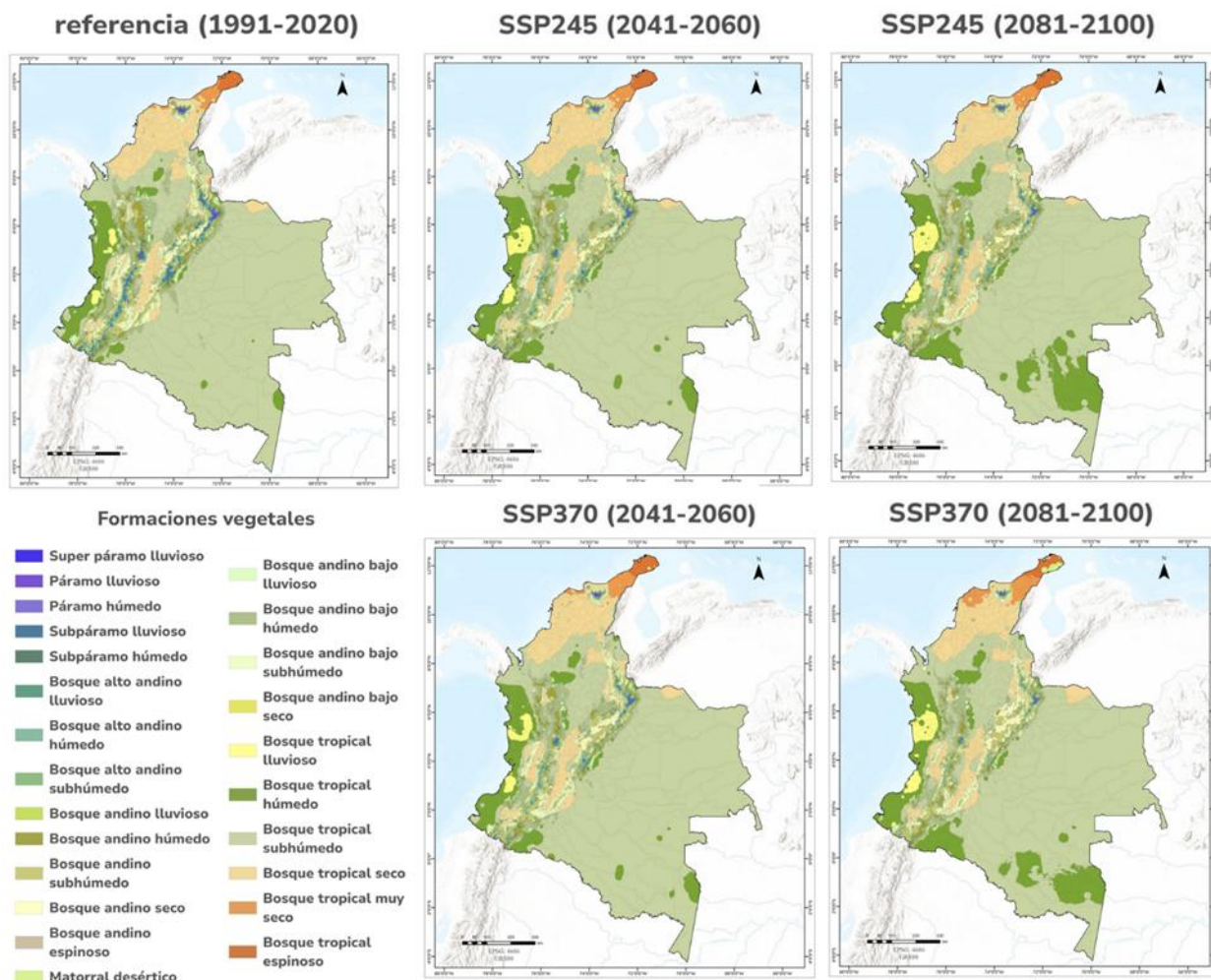


Figura IV.4. Distribución espacial de las formaciones vegetales (biomas) en Colombia bajo el clima 1991-2020 (izquierda) y en los escenarios SSP2-4.5 (arriba) y SSP3-7.0 (abajo) hacia 2041-2060 (columna del centro) y 2081-2100 (columna derecha).

En la siguiente tabla, se puede observar el cambio en el porcentaje de área total de cada formación vegetal de Holdridge en Colombia en los periodos 2041-2060 y 2081-2100 en los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 en relación con el periodo presente. En la parte derecha se presenta un gráfico por cada formación vegetal, para comparar los valores de cada periodo en los dos escenarios con respecto al periodo de referencia, en el orden que se encuentran en la tabla.

Tabla IV.1. Porcentaje de área total que cada formación vegetal de Holdridge ocupa en Colombia en el periodo actual y futuros 2041-2060 y 2081-2100 en los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0.

FORMACIÓN VEGETAL		REF.	SSP2-4.5		SSP3-7.0		
			41-60	81-100	41-60	81-100	
1	Super Paramo Lluv	0,022	0,01	0,00	0,01	0,00	
2	Paramo Lluvioso	0,128	0,06	0,04	0,05	0,02	
3	Paramo Humedo	0,002	0,00	0,00	0,00	0,00	
4	Sub Paramo Lluv	0,856	0,30	0,20	0,26	0,12	
5	Sub Paramo Hum	0,058	0,00	0,00	0,01	0,00	
6	Bosque Alto And Lluv	0,285	0,24	0,22	0,20	0,12	
7	Bosque Alto And Hum	1,431	1,16	0,96	1,14	0,65	
8	Bosque Alto And Sub Hum	0,251	0,07	0,03	0,08	0,04	
9	Bosque Andino Lluv	0,096	0,06	0,07	0,05	0,04	
10	Bosque Andino Hum	2,293	1,87	1,79	1,62	1,32	
11	Bosque Andino Sub Hum	3,696	3,14	2,94	3,26	2,84	
12	Bosque Andino Seco	0,612	0,52	0,42	0,58	1,01	
13	Bosque Andino Espinoso	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	
14	Matorral Desertico	0,000	0,00	0,02	0,03	0,25	
15	Bosque And Bajo Lluv	0,848	0,64	0,62	0,54	0,44	
16	Bosque Andino Bajo Hum	5,247	4,80	4,72	4,52	3,90	
17	Bosque Andino Bajo Sub Hum	4,279	3,32	2,98	3,60	2,92	
18	Bosque And Bajo Seco	0,067	0,04	0,03	0,05	0,09	
19	Bosque Tropical Lluv	0,464	1,33	1,70	0,93	1,58	
20	Bosque Tropical Hum	5,746	7,57	13,30	7,36	11,92	
21	Bosque Tropical Sub Hum	62,580	63,77	59,16	63,87	60,47	
22	Bosque Tropical Seco	9,662	9,72	9,33	10,20	10,21	
23	Bosque Tropical Muyseco	0,777	0,76	0,82	1,01	1,48	
24	Bosque T Seco espinoso	0,598	0,62	0,64	0,65	0,57	

En ambos escenarios de cambio climático se presenta disminución de bosques húmedos y aumento del área del bosque tipo seco. Los ecosistemas más afectados son los páramos, mostrando que en los 2 escenarios los páramos y subpáramos húmedos desaparecerían en el periodo 2041-2060, así como también ocurriría con el superparamo lluvioso. Los páramos y subpáramos lluviosos registrarían disminución drástica de su área. En el bosque tropical subhúmedo, se observa un comportamiento diferente a las demás formaciones vegetales, presentando aumento en su área a mediados de siglo en ambos escenarios y después a finales de siglo, disminución menor a la correspondiente al periodo de referencia. Y en los bosques tropicales lluviosos y húmedos, se observa aumento progresivo en su área.

La tabla IV.2, muestra el porcentaje de área que se reduciría para mediados (2041-2060) y finales de siglo (2081-2100), para las formaciones vegetales que registrarían pérdida en su área ante los dos escenarios de cambio climático planteados. Esta reducción aumentaría a lo largo del siglo.

Tabla IV.2. Porcentaje de pérdida de área de las formaciones vegetales en Colombia para los periodos futuros 2041-2060 y 2081-2100 en los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0.

FORMACIÓN VEGETAL	SSP2-4.5		SSP3-7.0	
	41-60	81-100	41-60	81-100
Super Paramo Lluv	71,3	87,2	70,8	95,6
Paramo Lluvioso	56,4	68,9	60,6	80,5
Paramo Humedo	100,0	100,0	100,0	100,0
Sub Paramo Lluv	64,7	76,9	69,4	85,4
Sub Paramo Hum	91,7	98,5	81,9	94,5
Bosque Alto And Lluv	16,7	22,0	31,4	59,3
Bosque Alto And Hum	18,8	32,8	20,6	54,5
Bosque Alto And Sub Hum	71,1	86,7	67,4	82,7
Bosque Andino Lluv	38,0	29,6	50,4	54,7
Bosque Andino Hum	18,5	21,8	29,3	42,3
Bosque Andino Sub Hum	15,2	20,5	11,8	23,1
Bosque And Bajo Lluv	24,0	26,7	36,3	48,7
Bosque Andino Bajo Hum	8,6	10,0	13,9	25,6
Bosque Andino Bajo Sub Hum	22,4	30,5	15,9	31,8

Los ecosistemas más afectados por el cambio climático son los que se localizan en pisos térmicos de mayor altitud correspondientes a páramos, en un rango de biotemperatura ente 0,1°C a 9°C. De estos, los que presentan mayor porcentaje de pérdida son los húmedos; el subpáramo húmedo de mas del 91% para el primer escenario y de 82% para el segundo, mientras que el páramo húmedo

presenta pérdida total hacia mediados de siglo. Los bosques andinos se verían más afectados en el segundo escenario. El bosque alto andino subhúmedo presentaría una reducción de más del 67% en el segundo escenario y de 71% en el primero hacia mediados de siglo. El bosque andino lluvioso presenta pérdida de 38% en el primer escenario y de 50% en el segundo, seguido del bosque andino bajo lluvioso con reducción de 24% en el primer escenario y 36% en el segundo. El bosque andino bajo húmedo y bosque andino bajo subhúmedo que son los que mayor área ocupan en el territorio colombiano presentan pérdidas de más de 8,6% y 22% respectivamente.

IV.1.3. La amenaza por cambio climático en las formaciones vegetales (biomas) hacia mediados y finales del siglo XXI

Colombia se destaca como uno de los países más megadiversos del mundo gracias a la gran cantidad de ecosistemas que posee. Estos comprenden un gradiente altitudinal y climático que va desde formaciones xerofíticas como sabanas y desiertos, hasta bosques tropicales secos y húmedos, culminando en ecosistemas de alta montaña como los páramos.

Una de las principales amenazas para la biodiversidad es el cambio climático, ya que el incremento de la temperatura local obliga a numerosas especies a desplazarse hacia altitudes mayores en busca de condiciones ambientales adecuadas para su supervivencia (IAvH, 2020)

Para el territorio colombiano el efecto adverso (amenaza) del cambio climático, en la dimensión biótica, se manifiesta a través de la reducción del área ocupada por los ecosistemas. Para el territorio colombiano, la amenaza estaría por la reducción de área de páramos, bosques altoandinos, andinos, específicamente superpáramo lluvioso, páramo lluvioso, páramo húmedo, subpáramo lluvioso, subpáramo húmedo, bosque alto andino lluvioso, bosque altoandino húmedo, bosque andino lluvioso, bosque andino húmedo y subhúmedo, bosque andino bajo lluvioso, bosque andino bajo húmedo y subhúmedo (ver tabla 5). A pesar de no registrar disminución general de las áreas, se observan cambios en la distribución de los bosques tropicales húmedos y secos. Estos ecosistemas, junto con los ecosistemas andinos son conocidos por su riqueza biológica pero alto grado de amenaza.

La reducción del área con condiciones climáticas óptimas para estos biomas constituye una amenaza crítica para los ecosistemas presentes en los municipios ubicados en las zonas, donde actualmente están presentes estas formaciones vegetales en Colombia (Pabón-Caicedo et al, 2024).

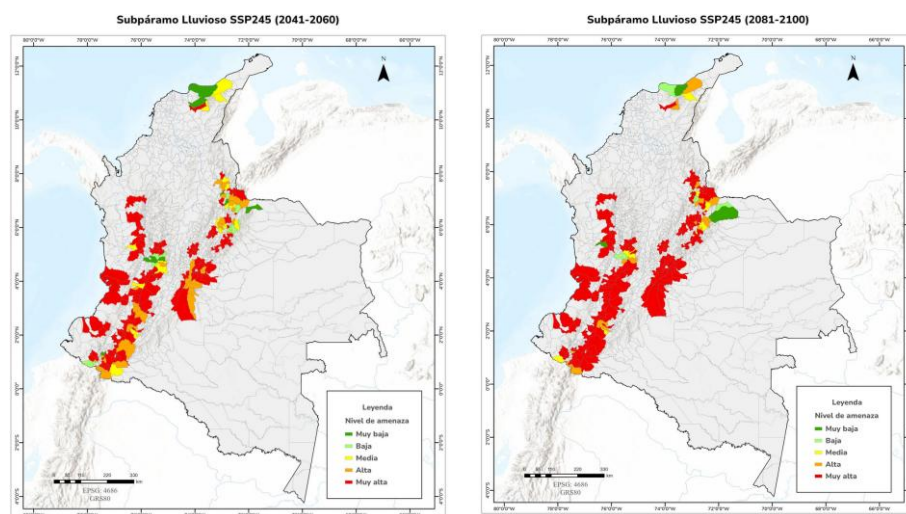
Además de la amenaza por cambio climático, procesos implicados en la transformación de los ecosistemas, como la deforestación, la degradación del suelo por erosión, el inadecuado uso del suelo, ejecución de proyectos de infraestructura, riesgos por incendios, minería, hidrocarburos y energía, representan amenazas importantes para los ecosistemas colombianos (Etter et al., 2017).

Estas amenazas que involucran la pérdida de bosques ponen en riesgo el estado de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

A continuación, se presentan formaciones vegetales amenazadas por cambio climático, representativas en términos de biodiversidad, área y vulnerabilidad climática, una por cada tipo de ecosistema y cada piso térmico en Colombia: páramo, subpáramo, bosque altoandino, bosque andino y bosque andino bajo.

IV.1.3.1 Subpáramo Lluvioso

El subpáramo Lluvioso registra el mayor porcentaje de área en los ecosistemas de páramo. En la *Figura IV.5* se presentan los cambios estimados en el área que habría en esta formación vegetal hacia mediados y finales del siglo en los 2 escenarios de cambio climático.



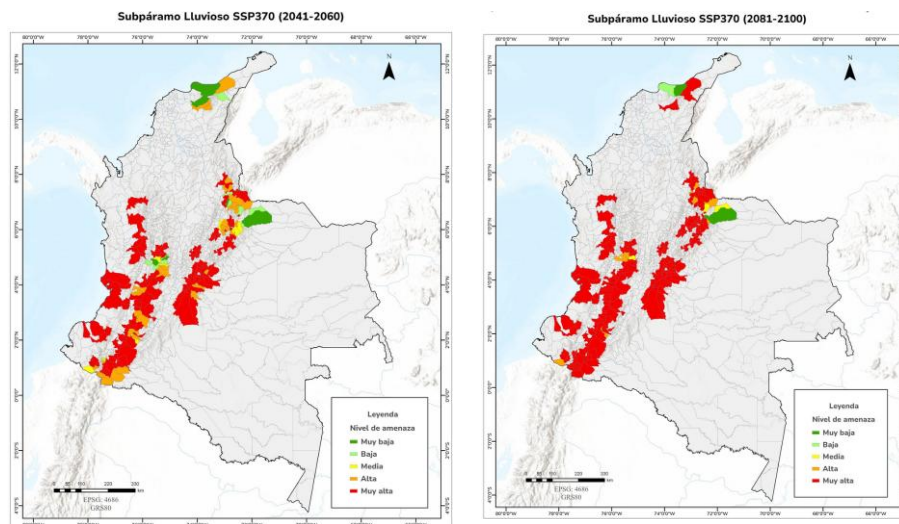


Figura IV.5. Amenaza por reducción del área con clima propicio para subpáramo lluvioso, generada por el cambio climático en Colombia en los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 hacia mediados (2041-2060) y finales (2081-2100) de siglo.

La amenaza al subpáramo lluvioso es muy alta para los municipios que en la actualidad tienen en su territorio dicha formación vegetal, ubicados principalmente en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Cauca, Valle del Cauca, Tolima, Norte de Santander, Antioquia, Meta, Caldas, Putumayo, Nariño, Huila, Chocó, Risaralda, Santander, Quindío y Magdalena. Bogotá presenta amenaza alta a muy alta hacia finales de siglo.

IV.1.3.2 Bosque Alto Andino Húmedo

El bosque alto andino húmedo registra el mayor porcentaje de área de los ecosistemas de alta montaña en Colombia (Tabla IV.2). Como se puede observar en la *Figura IV.6*, los municipios en los que esta formación vegetal se encuentra presentan varios niveles de amenaza en las diferentes regiones del país.

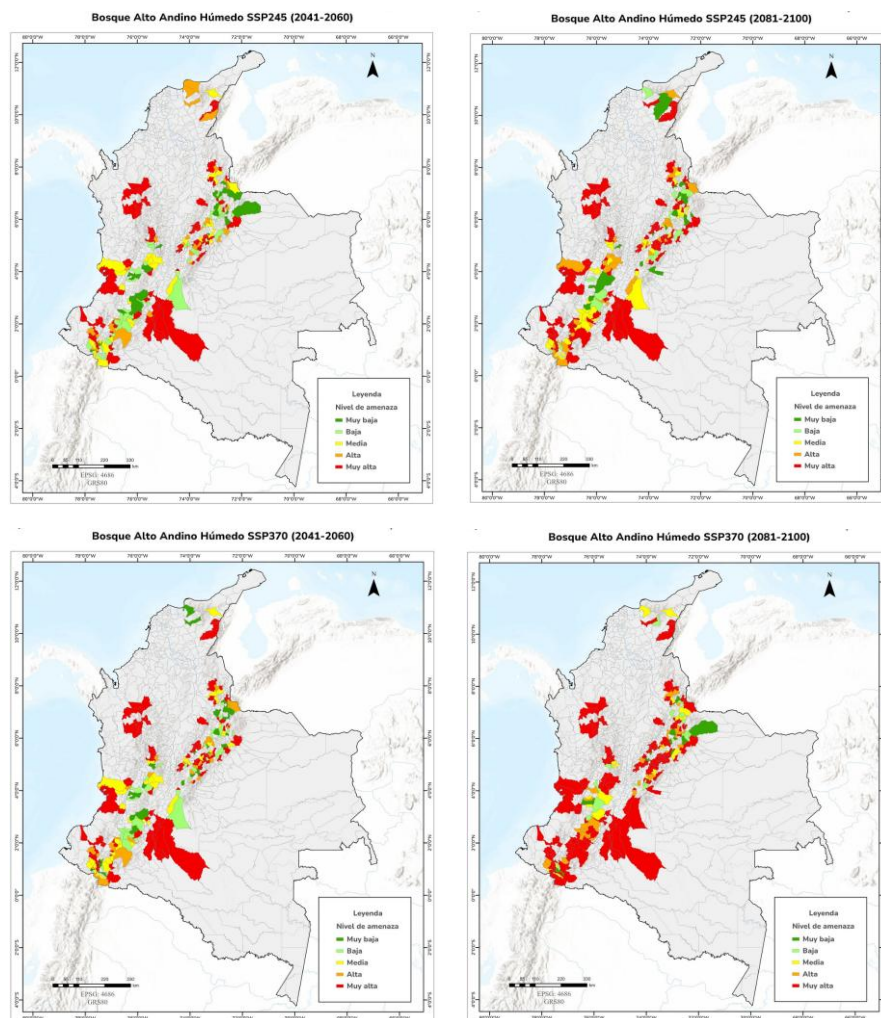


Figura IV.6. Amenaza por reducción del área con clima propicio para bosque alto andino húmedo, generada por el cambio climático en Colombia en los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 hacia mediados (2041-2060) y finales (2081-2100) de siglo.

El bosque altoandino húmedo enfrenta una amenaza muy alta en los municipios donde actualmente se encuentra esta formación vegetal, especialmente en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Antioquia, Santander, Nariño, Huila, Caldas, Norte de Santander, Caquetá, Valle del Cauca, Putumayo, La Guajira, Cauca, Cesar, Casanare, Meta y Tolima.

IV.1.3.3. Bosque Andino Bajo Húmedo

El bosque andino bajo húmedo se distribuye principalmente en las tres cordilleras de los Andes colombianos. De los bosques andinos, es el que presenta la mayor área en el país (ver figura IV.7). La siguiente figura presenta los cambios estimados en el área que habría en esta formación vegetal hacia mediados y finales del siglo.

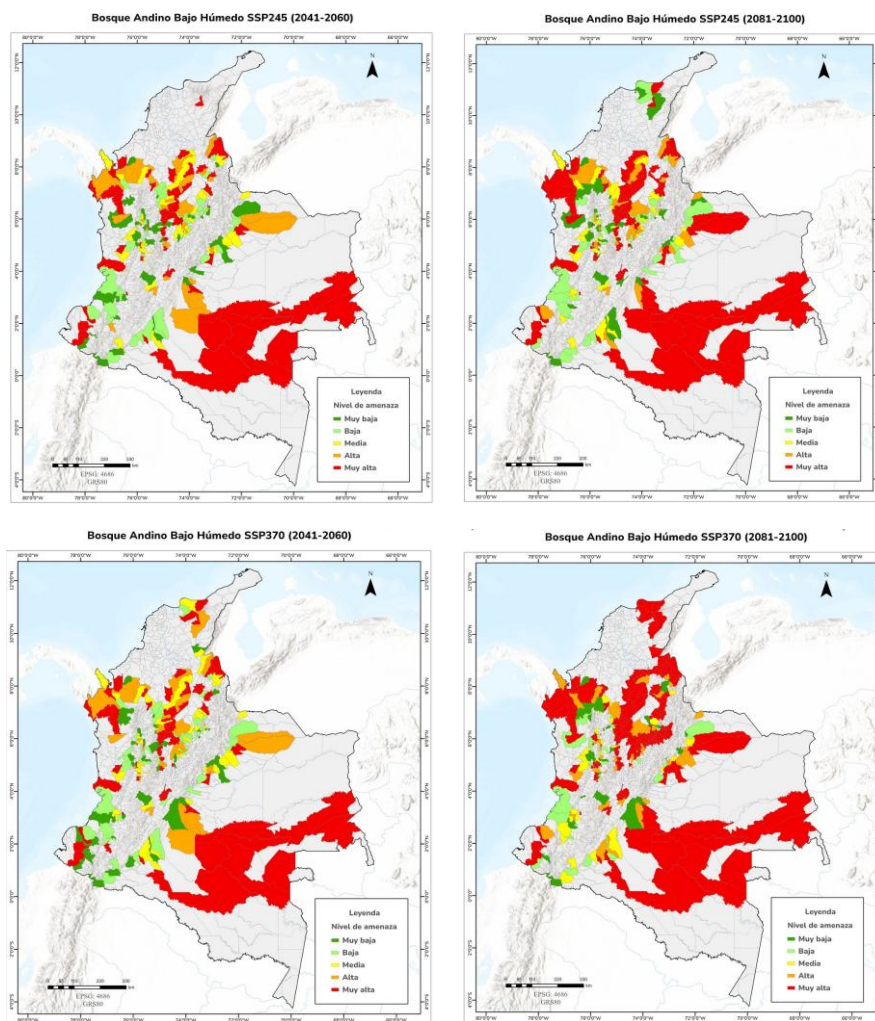


Figura IV.7. Amenaza por reducción del área con clima propicio para bosque andino bajo húmedo, generada por el cambio climático en Colombia en los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 hacia mediados (2041-2060) y finales (2081-2100) de siglo.

La amenaza por la reducción del bosque andino bajo húmedo se encuentra en todas las regiones del país. La región amazonia es la que presenta el mayor nivel de amenaza por perdida de esta formación vegetal. La amenaza al bosque andino bajo húmedo es muy alta para los municipios,

ubicados principalmente en los departamentos de Antioquia, Tolima, Bolívar, Guaviare, Chocó, Norte de Santander, Santander, Guainía, Nariño, Caquetá, Vaupés, Casanare, Cesar, Caldas, Quindío, Córdoba, Cauca, Risaralda, Boyacá, Meta, Cundinamarca, Córdoba y La Guajira.

IV.1.3.4. Páramo Lluvioso

El páramo lluvioso, crucial en el abastecimiento hídrico, presenta una reducción drástica en su área (tabla IV.1) y una amenaza muy alta para casi todos los municipios en los que esta formación vegetal se encuentra, principalmente en la región andina (Figura IV.7).

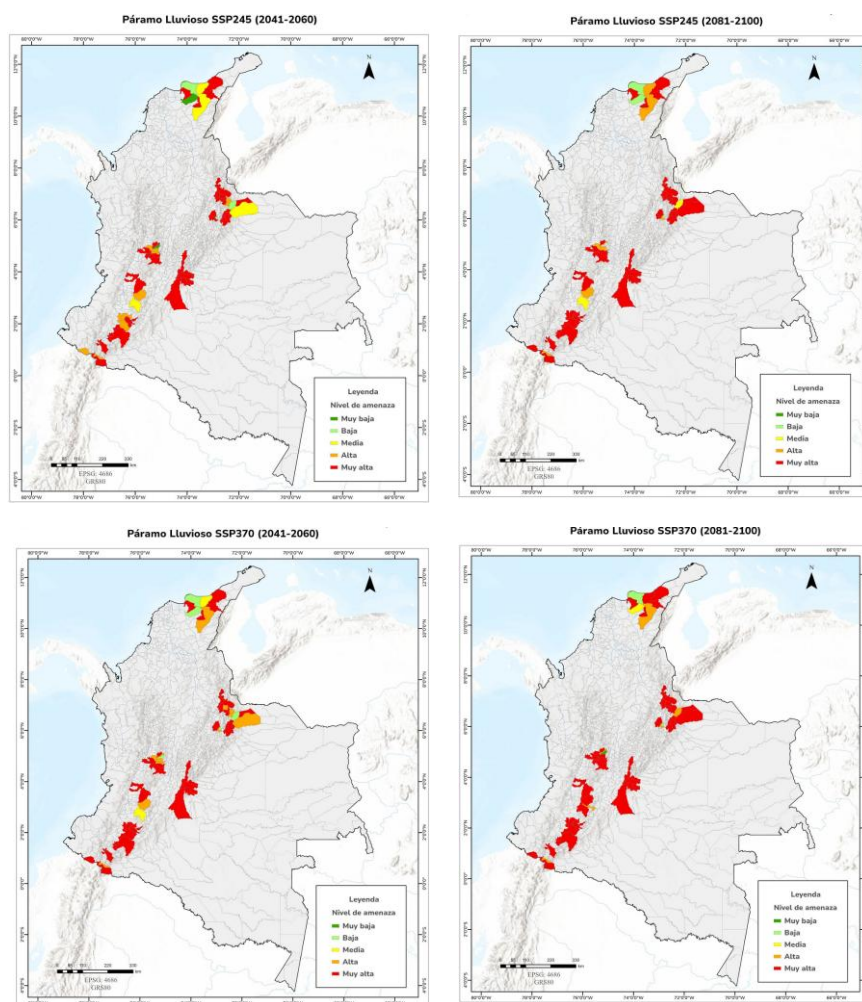
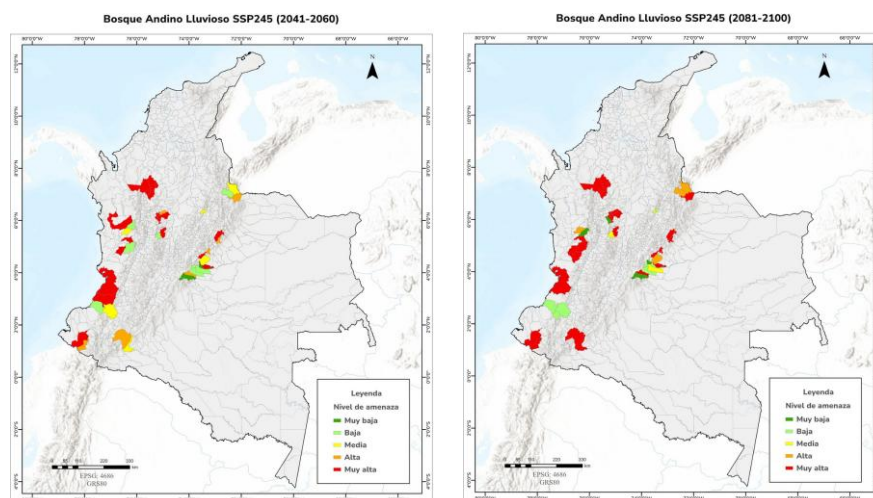


Figura IV.7. Amenaza por reducción del área con clima propicio para el páramo lluvioso, generada por el cambio climático en Colombia en los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 hacia mediados (2041-2060) y finales (2081-2100) de siglo.

Los municipios donde actualmente se encuentra esta formación vegetal, enfrentan una amenaza muy alta, ubicados principalmente en inmediaciones con el páramo de Santurbán, Almorzadero, Guantiva-La Rusia, La cocha- Patascoy, Doña Juana- Chimayoi, Pisba, Cruz Verde- Sumapaz, Los Nevados, Guanacas-Purace- Coconucos, Sotará, Las Hermosas, Sierra Nevada de Santa Marta, Los Nevados, Chingaza.

IV.1.3.5. Bosque andino lluvioso

El bosque andino lluvioso, se caracteriza por temperaturas moderadas lo que permite una gran diversidad de especies. Este ecosistema se extiende principalmente en la región pacífica y Andina. Como se puede observar en la *Figura IV.8*, la mayoría de los municipios en los que esta formación vegetal se encuentra, presentan un nivel de amenaza muy alto y alto.



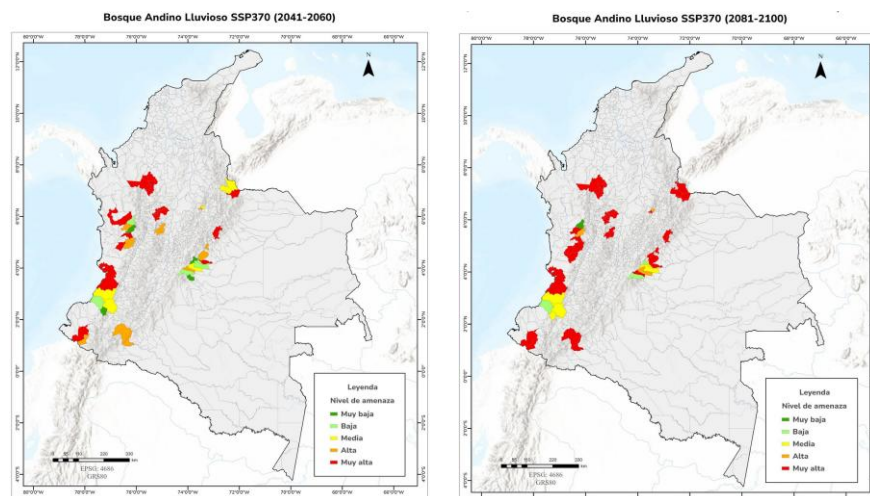


Figura IV.8. Amenaza por reducción del área con clima propicio para el bosque andino lluvioso generada por el cambio climático en Colombia en los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 hacia mediados (2041-2060) y finales (2081-2100) de siglo.

La amenaza al bosque andino lluvioso es muy alta para los territorios que en la actualidad tienen esta formación vegetal, como es el caso de los municipios que se ubican en el departamento de Antioquia el cual es el más afectado por la pérdida de esta formación vegetal. Le sigue Chocó, Caldas, Cauca, Valle del Cauca, Cundinamarca, Meta, Boyacá, Nariño. A finales de siglo se ven afectados también Norte de Santander y Santander.

Conclusiones generales

De acuerdo con las proyecciones de cambio climático en Colombia, habría un aumento del área con vegetación de tipo bosque seco andino, y reducciones en las áreas con bosques andinos húmedos. Los ecosistemas que están a mayor altitud son los más afectados, como es el caso del super paramo lluvioso y los páramos y subpáramos húmedos, los cuales desaparecería a mediados de siglo. El bosque tropical lluvioso y húmedo seco muestra cambios en su distribución, pero no pérdida general de su área.

La pérdida de área de los biomas, especialmente de las formaciones vegetales paramunas y de bosque altoandino y andino, pone en riesgo las especies de flora y fauna que habitan allí y los servicios ecosistémicos que prestan los bosques a los humanos como lo son regulación del ciclo hidrográfico, provisión y regulación hídrica, entre muchos otros.

La amenaza que el cambio climático representa en la dimensión biótica de los municipios del territorio colombiano es la desaparición del área climáticamente favorable al superpáramo lluvioso,

páramo lluvioso, páramo húmedo, subpáramo lluvioso, subpáramo húmedo, bosque alto andino lluvioso, bosque altoandino húmedo, bosque andino lluvioso, bosque andino húmedo y subhúmedo, bosque andino bajo lluvioso, bosque andino bajo húmedo y subhúmedo, así como bosque tropical.

Esta desaparición de área climáticamente favorable llevaría a la pérdida parcial de área de los ecosistemas y en algunos casos total (páramo húmedo) o casi total como ocurre con los demás páramos. Esta reducción aumentaría a lo largo del siglo. De los bosques altoandinos, el subhúmedo es el que más se vería afectado con una reducción de más del 67% en el segundo escenario y de 71% en el primero hacia mediados de siglo. Le sigue el bosque andino, principalmente el lluvioso que también se vería más afectado en el segundo escenario con pérdida de más del 50%.

La mayoría de los municipios de Colombia, presentan amenaza alta y muy alta por la pérdida de páramos, subpáramo lluvioso, bosque altoandino húmedo, bosque andino lluvioso y bosque andino bajo húmedo.

Por reducción del Páramo lluvioso los municipios más afectados son los ubicados en inmediaciones a los páramos principalmente Santurbán, Almorzadero, Guantiva - La Rusia, La cocha- Patascoy, Doña Juana- Chimayoi y Pisba. En cuanto al subpáramo lluvioso, presentan amenaza muy alta los municipios ubicados principalmente en los departamentos de principalmente en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Cauca.

La amenaza por la reducción de bosque altoandino húmedo es muy alta para los municipios ubicados especialmente en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Antioquia, Santander y Nariño. Aunque el bosque andino bajo húmedo se encuentra en todas las regiones del país, la región amazonia es la que presenta el mayor nivel de amenaza. Y a nivel de departamentos el más afectado es Antioquia, quien lo es también por la pérdida de bosque andino lluvioso, seguido en afectación por la pérdida de esta formación el departamento de Choco.

Colombia es uno de los países más biodiversos del mundo, pero enfrenta serias amenazas por el cambio climático, que podría llevar a la desaparición de áreas climáticamente favorables para muchas especies de flora y fauna. Esto sumado a las amenazas antrópicas que enfrentan los ecosistemas en el país. Es fundamental implementar medidas de conservación y adaptación para proteger los ecosistemas y la biodiversidad de Colombia.



Contratos GGC 1113-2024 y GGC 1949-2025

Suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad Nacional de Colombia con el objeto de “Prestar servicios para apoyar el desarrollo de las actividades priorizadas de mediano y largo plazo contenidas en el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático 2050” y “Prestar Servicios de investigación Científica para la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático PIGCCme 2050 a través de la implementación del Sistema de Información Climática del MME”



IV.2. Amenaza por cambio climático en la dimensión de recurso hídrico

En la Figura IV.9 se presentan los rendimientos hídricos en subzonas hidrográficas en el período 1991-2020 y para diferentes períodos en el siglo XXI, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. Se presenta tanto aumento en algunas regiones, como disminución en otras. Se destaca aumento hacia el occidente del país, en la región del Pacífico, y disminución marcada hacia el nororiente, en la región Caribe, especialmente en la Guajira.

La reducción en el rendimiento hídrico es más marcada para el escenario SSP3 7.0 a finales de siglo. En esta reducción se destacan los municipios de Manaure y Maicao, en el departamento de La Guajira para ambos escenarios a finales de siglo, con una reducción mayor al 100%. En cuanto a aumento, el mayor valor se presenta en el escenario SSP2 4.5.

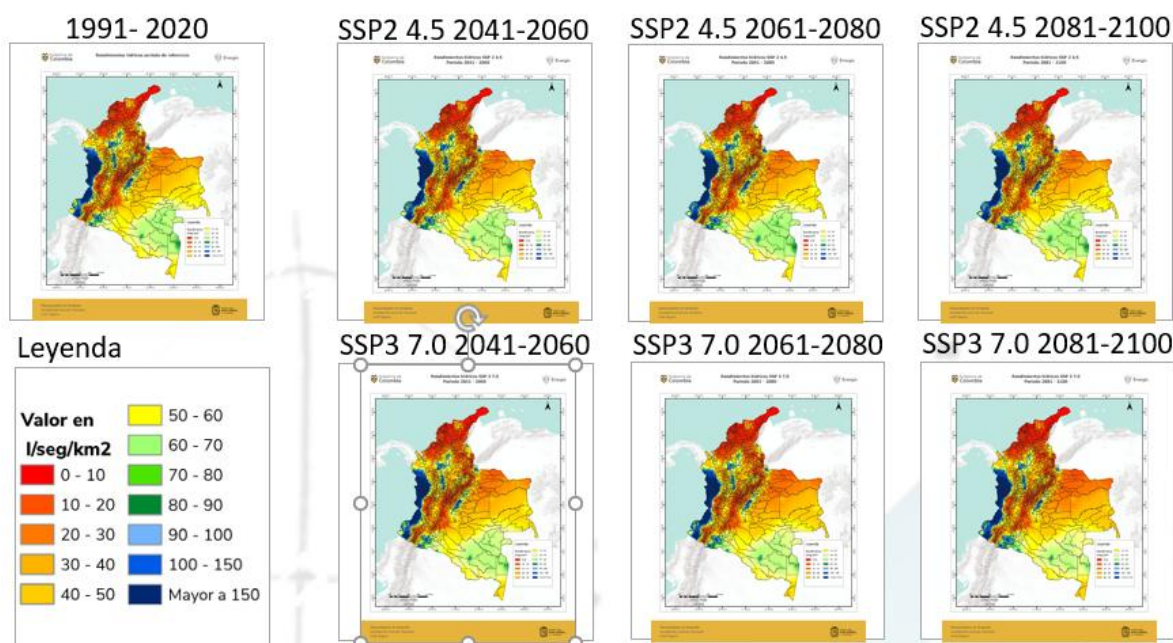


Figura IV.9. Rendimientos hídricos en subzonas hidrográficas en el período 1991-2020 (período de referencia) y, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0, para los períodos 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100

La Figura IV.10 presenta la amenaza por reducción de los rendimientos hídricos en subzonas hidrográficas. En términos generales, gran parte del noroccidente y occidente, en donde se concentran las disminuciones de los rendimientos hídricos, la amenaza es baja; no obstante, en el escenario SSP3-7.0 desde mitad del siglo XXI se tendrían municipios en los departamentos de La Guajira, Cesar, Atlántico y Magdalena con amenaza muy alta y alta en esta dimensión territorial.

De otra parte, la amenaza por aumento de los rendimientos hídricos (Figura IV.11), que se concentra en el sur, suroccidente y occidente, sería alta y muy alta para los municipios de los departamentos de la región del Pacífico colombiano (Nariño, Cauca, Valle y Chocó) y de Antioquia y Córdoba.

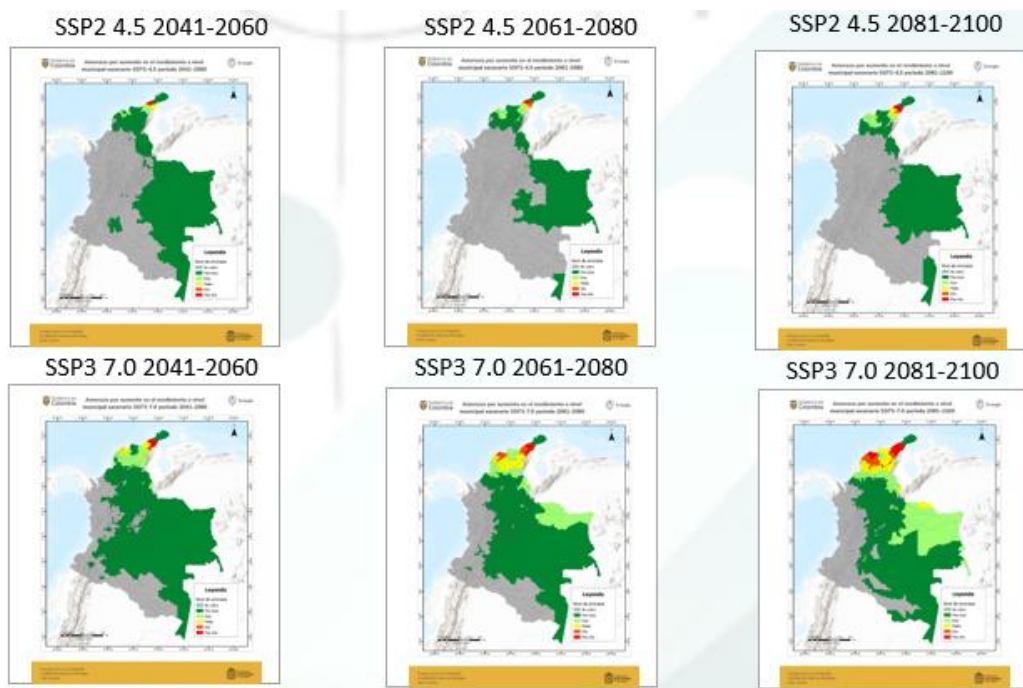


Figura IV.10. Amenaza por reducción de los rendimientos hídricos en subzonas hidrográficas hacia 2041-2060 (izquierda), 2061-2080 (centro) y 2081-2100 (derecha), bajo los escenarios SSP2-4.5 (arriba) y SSP3-7.0 (abajo).

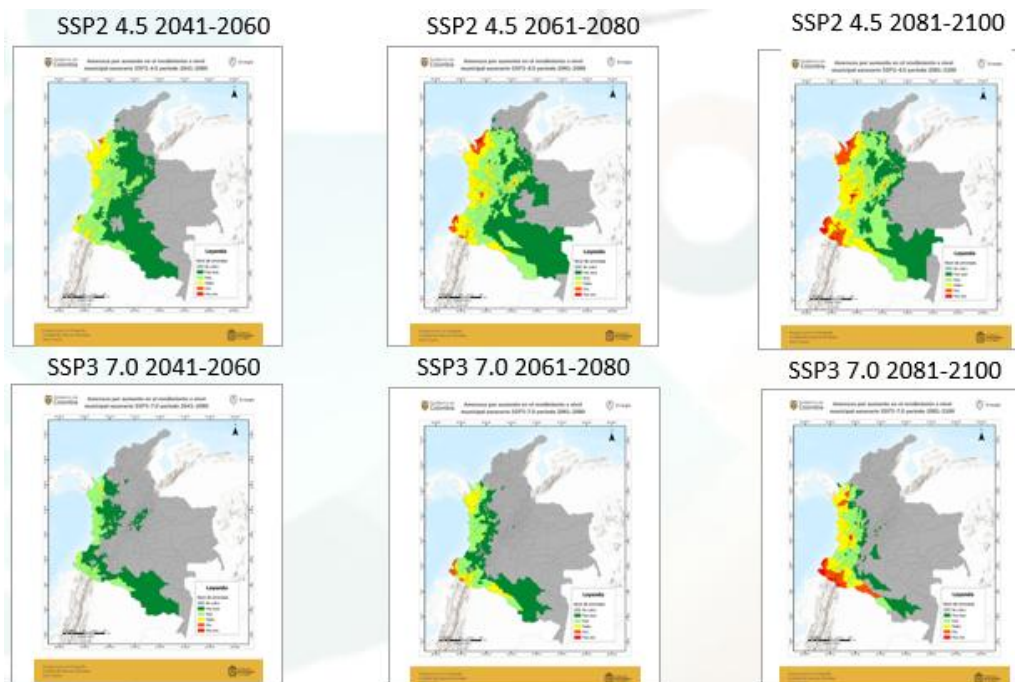


Figura IV.11. Amenaza por aumento de los rendimientos hídricos en subzonas hidrográficas hacia 2041-2060 (izquierda), 2061-2080 (centro) y 2081-2100 (derecha), bajo los escenarios SSP2-4.5 (arriba) y SSP3-7.0 (abajo).

IV.3. Amenaza por cambio climático sobre la dimensión riesgo de desastres

La Figura IV. 11a, b y c muestra respectivamente la susceptibilidad a deslizamientos, incendios forestales e inundaciones de larga duración en el período 1991-2020 y a mediados y finales del siglo XXI, bajo escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0.

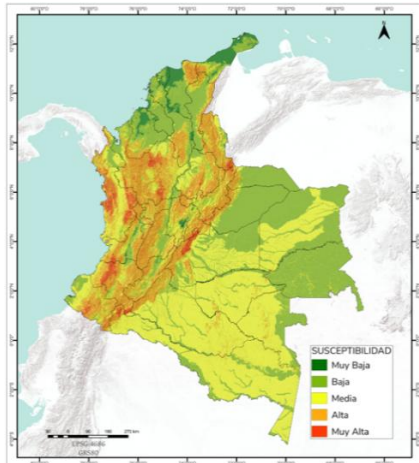
La susceptibilidad a deslizamientos en el período 1991-2020 (Figura IV.11a, izquierda-arriba), por la pendiente y el tipo de suelos y humedad, se concentra principalmente en las estribaciones de las zonas montañosas ubicadas en las tres cordilleras colombianas, el Macizo Colombiano, la Sierra Nevada de Santa Marta, la serranía Baudó-Darién y la serranía de La Macarena, regiones sobre las que se observa alta susceptibilidad. Los piedemontes llanero y amazónico, como también la vertiente hacia el Pacífico de la Cordillera Occidental, concentran la mayor área de susceptibilidad Alta y Muy Alta a deslizamientos. Esta distribución coincide con la descrita por el IDEAM en los boletines diarios; también coincide con el estudio sobre deslizamiento efectuado por el Servicio Geológico Colombiano.

Al analizar la distribución espacial de la susceptibilidad a deslizamientos que se presenta en la misma Figura IV11a, se puede ver que para mediados del siglo XXI (panel superior) y para finales del siglo XXI (panel inferior), en los dos escenarios, prácticamente es la misma. Eso se explica porque los cambios de área de susceptibilidad alta y muy alta son pequeños y no se alcanzan a representar en la escala de los mapas insertados en esta figura).

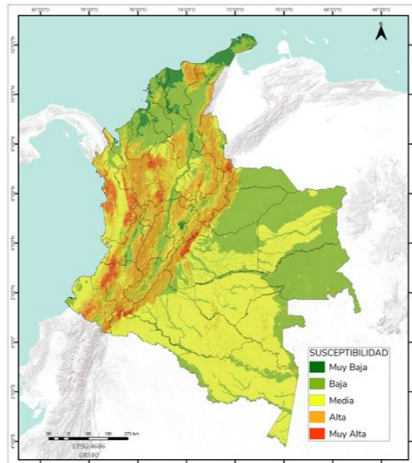
En cuanto a la susceptibilidad a incendios forestales (Figura IV.11b) es posible notar que en el período 1991-2020 las categorías alta y muy alta se localizan sobre en la región andina, principalmente en la Serranías del Perijá y San Lucas, sobre el Macizo Colombiano; se destaca a simple vista la susceptibilidad muy alta sobre los altiplanos Cundiboyacense y de Túquerres-Ipiales, en el sector norte del complejo de páramos Tamá (Santander), en el norte del páramo de Sumapaz, algunas zonas de los páramos cercanos a la Sierra Nevada del Cocuy, en el Cañón del río Chicamocha y en el norte de la Cordillera Occidental. En la región del Caribe, la susceptibilidad a incendio forestales “alta y muy alta se registra sobre la Península de La Guajira, en la Sierra Nevada de Santa Marta, en la Serranía de San Jerónimo, los Montes de Oca y los Monte de María. Para la región del Pacífico colombiano, susceptibilidad alta y muy alta a incendios forestales en el período 1991-2020 se localiza sobre la Serranía Baudó-Darién y en algunos sectores de la vertiente occidental de la Cordillera Occidental. En la Orinoquia y en la Amazonía, la susceptibilidad a incendios forestales es baja, solo en un sector del Departamento de Arauca, la susceptibilidad es media y, en una angosta franja en la vertiente de la Cordillera oriental es la susceptibilidad es alta.

La distribución espacial de la susceptibilidad por incendios en escenarios climáticos para períodos futuros, que se muestra en la Figura IV.11b (columnas central y derecha) muestra, en general, una disminución del área con categoría alta y muy alta; sin embargo, hacia el nororiente del país aumentaría el área con susceptibilidad alta y muy alta a incendios forestales, especialmente en el escenario SSP3-7.0.

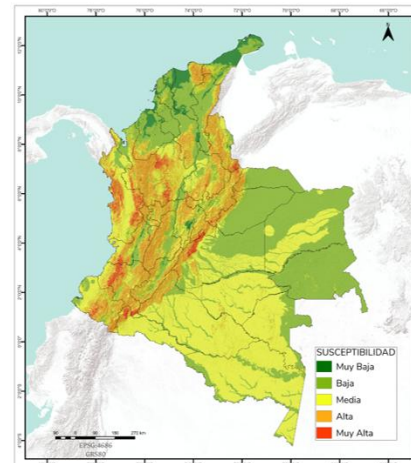
SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS 1991-2020



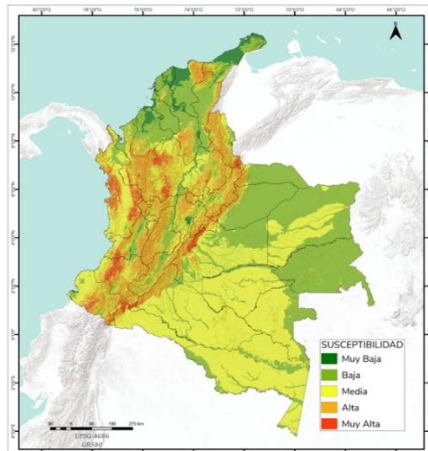
SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS 2041-2060 SSP2-4.5



SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS 2041-2060 SSP3-7.0



SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS 2081-2100 SSP2-4.5



SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS 2081-2100 SSP3-7.0

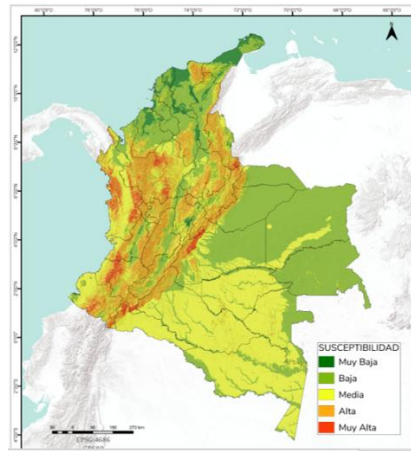
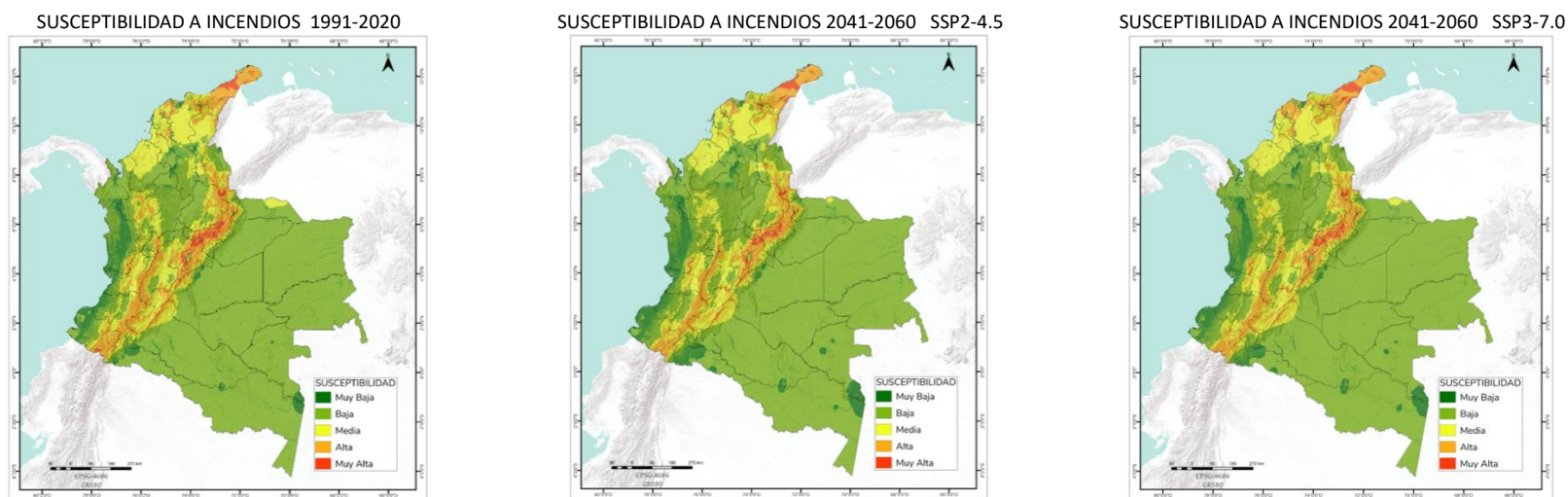


Figura IV. 11.(a). Susceptibilidad a deslizamientos en el período 1991-2020 y a mediados y finales del siglo XXI, bajo escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0



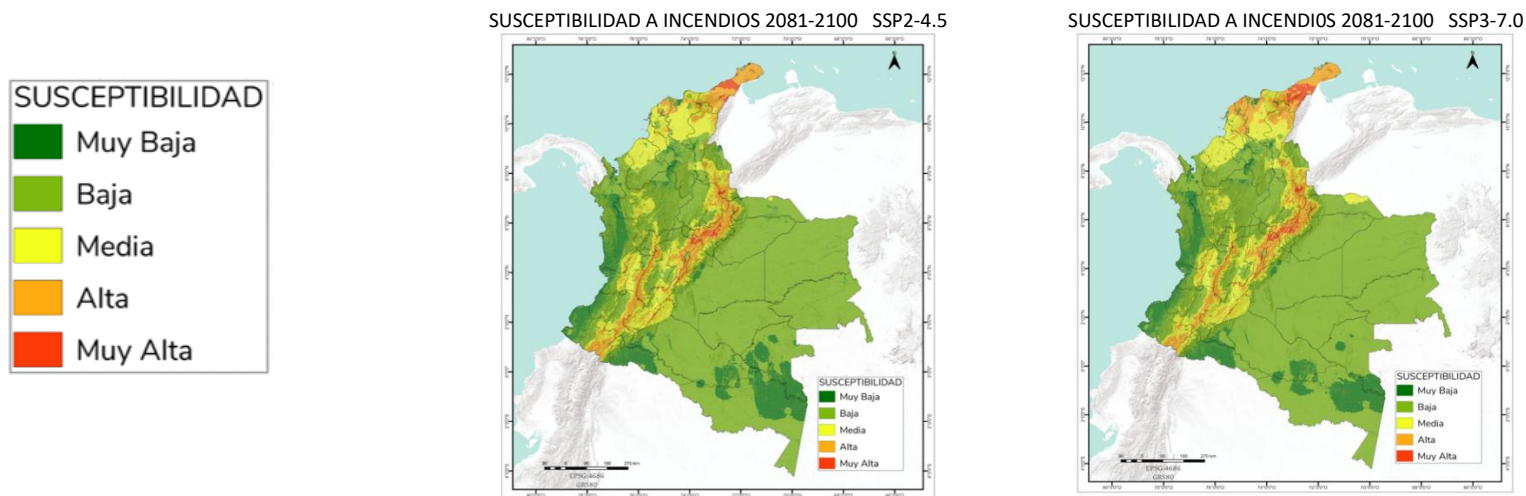
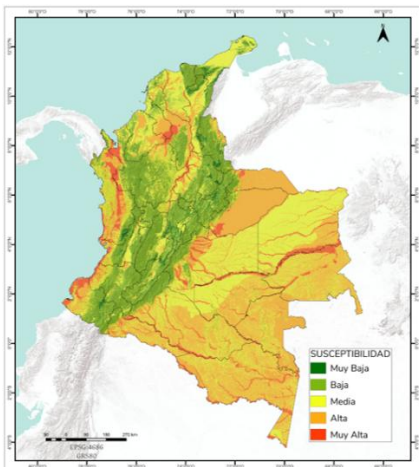
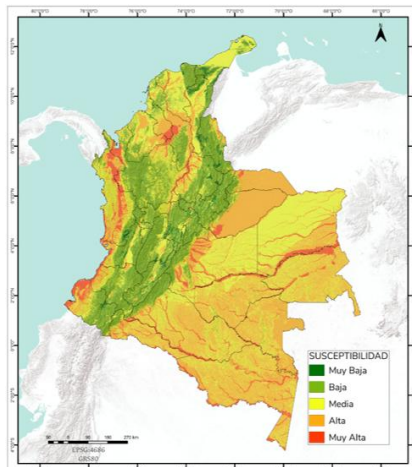


Figura IV. 11.(b). Susceptibilidad a incendios forestales en el período 1991-2020 y a mediados y finales del siglo XXI, bajo escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0

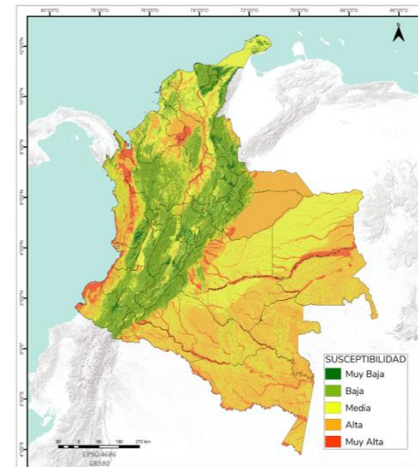
SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES 1991-2020



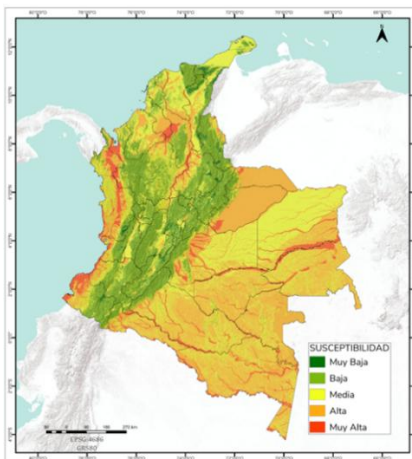
SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES 2041-2060 SSP2-4.5



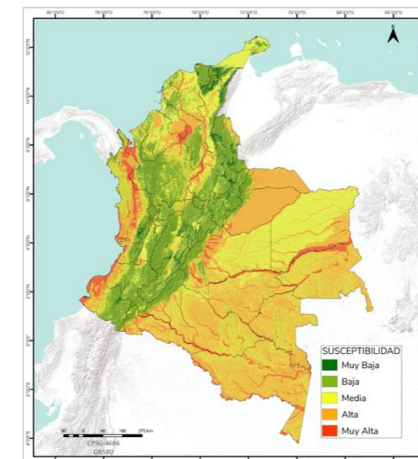
SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES 2041-2060 SSP3-7.0



SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES 2081-2100 SSP2-4.5



SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES 2081-2100 SSP3-7.0





Contratos GGC 1113-2024 y GGC 1949-2025

Suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad Nacional de Colombia con el objeto de “Prestar servicios para apoyar el desarrollo de las actividades priorizadas de mediano y largo plazo contenidas en el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático 2050” y “Prestar Servicios de investigación Científica para la actualización del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático PIGCCme 2050 a través de la implementación del Sistema de Información Climática del MME”



Figura IV. 11.(c). *Susceptibilidad a inundaciones de larga duración en período 1991-2020 y a mediados y finales del siglo XXI, bajo escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP3-7.0*

La Figura IV.11(c) muestra la distribución espacial de la susceptibilidad a inundaciones de larga duración en el territorio colombiano, para 1991-2020 y para mediados y para finales del siglo XXI en dos escenarios. En el período de referencia, la categoría de amenaza muy alta se registra en los valles de los grandes ríos (Atrato, Magdalena medio y bajo, Cauca bajo y San Jorge (sector de La Mojana), Caquetá, Meta y Arauca), en las zonas bajas hacia el Pacífico de Nariño, Cauca y Valle, y a lo largo de los ríos que bajan del piedemonte llanero y amazónico. Esta distribución coincide con la presentada por el IDEAM en el mapa de inundaciones y zonas inundables.

El cambio en el área con susceptibilidad alta y muy alta hacia mediados o finales del siglo XXI es relativamente pequeño y no se ve claramente en los respectivos mapas de la Figura IV.11(c). En general, en gran parte del sector nororiental del país habría disminución de esta área, en el sector suroccidental se presentaría aumento de las áreas con susceptibilidad alta y muy alta.

El aumento de área que la susceptibilidad alta y muy alta ocupa en cada municipio representa la amenaza asociada al cambio climático sobre la dimensión riesgo de desastre por los fenómenos extremos analizados). A continuación, se describe la amenaza a esta dimensión en cada uno de los fenómenos extremos analizados para el presente estudio.

IV.3.1. Amenaza por cambio climático sobre la dimensión riesgo de desastre por deslizamientos

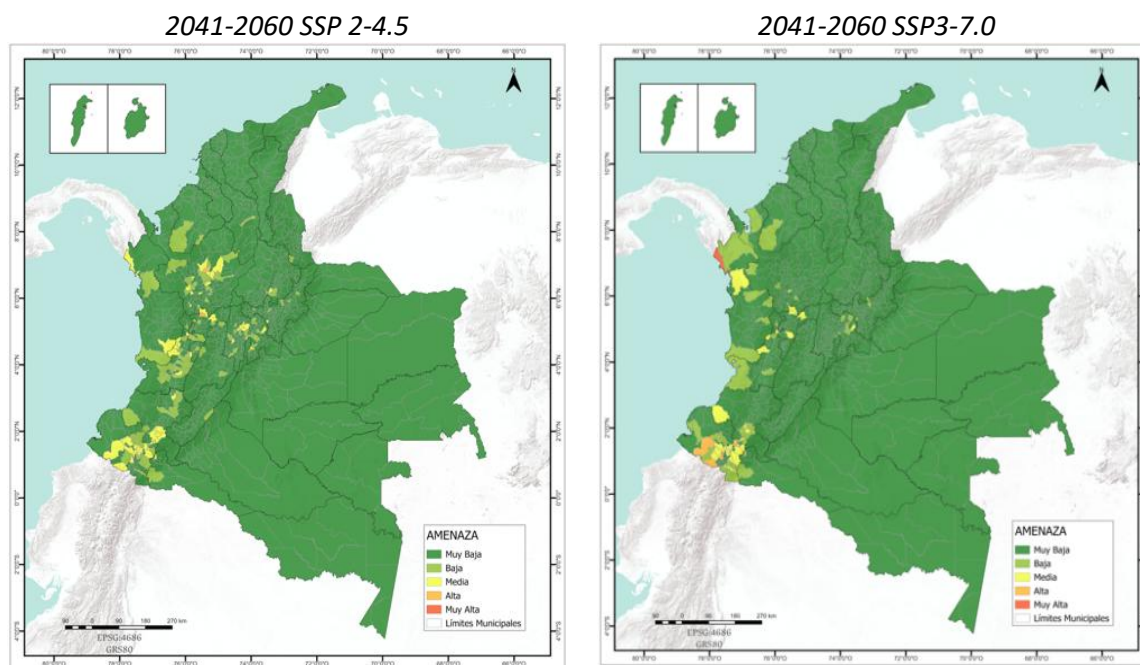
La Figura IV.12 presenta la amenaza por cambio climático sobre la dimensión riesgo de desastre por deslizamientos para el periodo 2041-2060 (mediados de siglo XXI) y 2081-2100 (finales del siglo XXI) en los escenarios SSP 2-4.5 y SSP 3-7.0.

Como se puede apreciar en la Figura IV.12, en la región Andina, hacia mediados de siglo, bajo el escenario SSP2-4.5, se tendría presencia considerable de municipios con amenaza baja y media; tres municipios con amenaza alta; en general, el mayor número de municipios con amenaza media y alta se localiza en la Cordillera Central y Occidental. Para este mismo período, en el escenario SSP3-7.0 habría más municipios con amenaza muy baja y no habría municipios clasificados con amenaza alta. Hacia finales de siglo (Figura IV.12, panel inferior), en el escenario SSP2-4.5, la región andina mantendría un grado de amenaza similar a lo que, bajo el mismo escenario, se prevé para mediados de siglo XXI; pero en el escenario SSP3-7.0, disminuye el número de municipios que presentan amenaza alta y media por cambio climático, los que mantienen esta categoría de amenaza se concentran en la Cordillera Central y, al sur, en el Macizo colombiano.

En la región Caribe, la amenaza por cambio climático en la dimensión de riesgo de desastre por deslizamientos, en el período 2040-2100 (Figura IV.12, panel superior), tanto bajo el escenario SSP2-4.5 como en el SSP3-7.0, sería muy baja en la mayoría de los municipios. Hacia el período 2081-2100 se observaría una situación similar.

Para la región del Pacífico colombiano la amenaza por cambio climático en la dimensión de riesgo de desastre por deslizamientos, tanto a mediados de siglo como a finales (Figura IV.12) y en los dos escenarios, sería predominantemente baja y muy baja, con excepción de algunos municipios que tienen área con pendiente en la Cordillera occidental; se destaca el municipio de Jurado (Chocó) que tendría amenaza muy alta a mediados del siglo XXI en el escenario SSP2-4.5.

Los municipios de la Orinoquia y la Amazonía en su mayoría tendrían muy baja amenaza por cambio climático en la dimensión de riesgo de desastre por deslizamientos, con excepción de los que se sitúan al oeste, en las estribaciones de la Cordillera oriental, que estarían con amenaza media y alta.



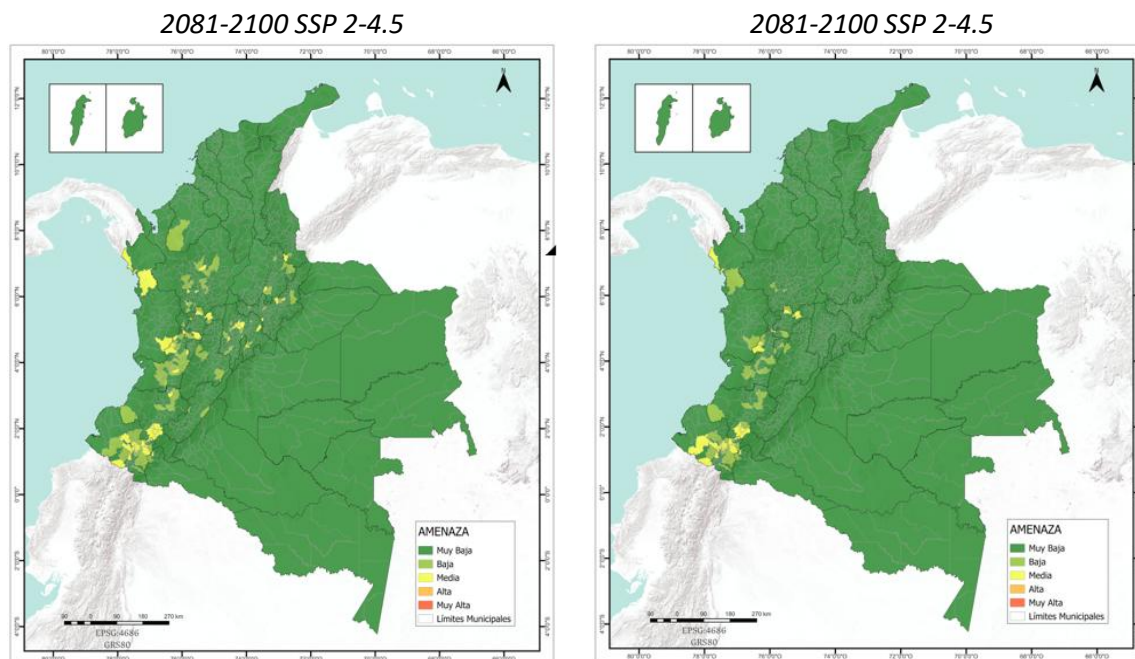


Figura IV.12. Amenaza por cambio climático sobre la dimensión **riesgo de desastre por deslizamientos** para el periodo 2041-2060 (arriba) y 2081-2100 (abajo) en los escenarios climáticos SSP 2-4.5 (izquierda) y SSP 3-7.0 (derecha).

IV.3.2. Amenaza por cambio climático sobre la dimensión riesgo de desastre por inundaciones de larga duración

Por amenaza que el cambio climático pondría a la dimensión territorial “riesgo de desastre por inundaciones de larga duración”, se entiende el aumento que tendría el área municipal con alta y muy alta susceptibilidad a inundaciones en comparación con la observada en el período de referencia. La Figura IV.13 muestra la amenaza por cambio climático sobre la dimensión riesgo de desastre por inundaciones de larga duración que se tendía hacia mediados (panel superior) y a finales (panel inferior) del siglo XXI en los escenarios SSP2-4.5 (izquierda) y SSP3-7.0 (derecha). Como se puede apreciar en una mirada general categoría alta o muy alta de esta amenaza prácticamente no se presentaría a lo largo del siglo XXI, en los dos escenarios analizados, lo que se genera por los pequeños cambios de área la susceptibilidad.

En una mirada más detallada es posible identificar que, algunos municipios de Córdoba y Sucre, a mediados de siglo y en el escenario SSP2-4.5 podrían estar bajo amenaza media y alta en la dimensión riesgo de desastre por inundaciones de larga duración; en este mismo período y escenario, habría municipios del Alto Magdalena y de la cuenca media del río Bogotá, con amenaza media. En el escenario SSP3-7.0, a mediados de siglo, habría menos municipios amenazados por el

efecto del cambio climático en la dimensión de riesgo de desastre por inundaciones de larga duración; en este escenario, para Córdoba y Sucre la máxima categoría de esta amenaza es media, en tanto que en la cuenca media del río Bogotá y en el valle de Ubaté habría municipios con amenaza alta y muy alta.

Hacia finales del siglo XXI (2081-2100), en el escenario SSP2-4.5, habría más municipios de los departamentos de Córdoba y Sucre con amenaza media y alta que lo que habría bajo el mismo escenario a mediados de siglo; en la cuenca media del río Bogotá, varios municipios tendrían amenaza muy alta; algunos municipios de la municipios en la Amazonia estarían bajo amenaza media; en el resto del país la mayor categoría de amenaza por cambio climático en esta dimensión es la media, con predominio de amenaza muy baja. En el escenario SSP3-7.0, a finales de siglo, sólo un municipio en el Tolima tendría categoría muy alta de esta amenaza, en el resto del país la mayor categoría es media, la cual estaría en dos municipios de Córdoba, en algunos municipios aledaños al río Magdalena en los departamentos de Tolima, Cundinamarca y en la Amazonia.

Los municipios de la Orinoquia y la Amazonía en su mayoría tendrían muy baja amenaza por cambio climático en la dimensión de riesgo de desastre por deslizamientos, con excepción de los que se sitúan al oeste, en las estribaciones de la Cordillera oriental, que estarían con amenaza media y alta.

2041-2060 SSP 2-4.5

2041-2060 SSP3-7.0

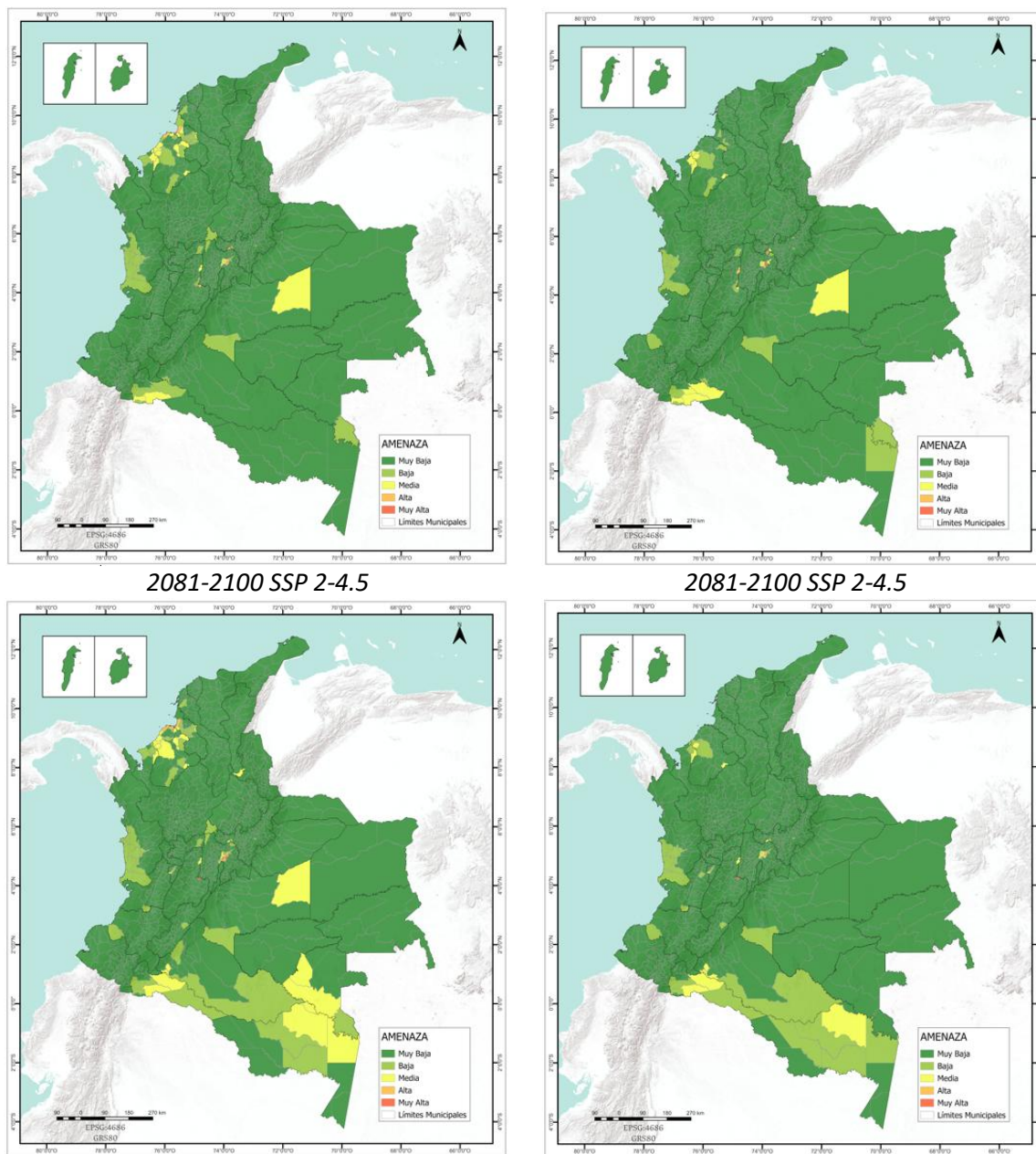
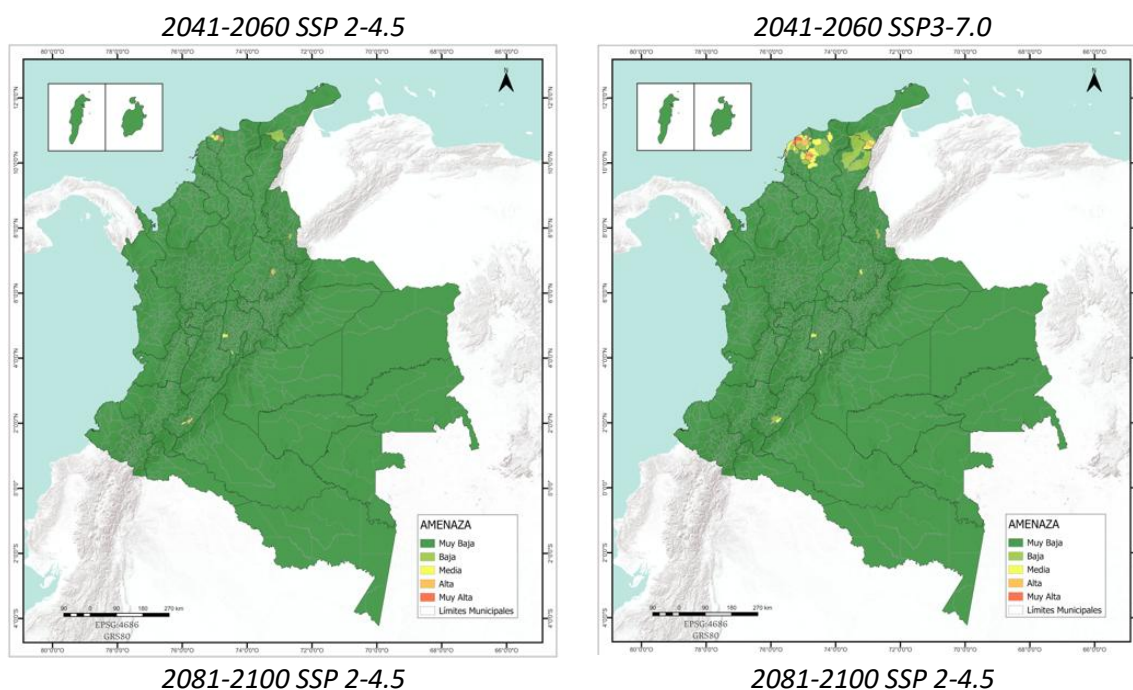


Figura IV.13. Amenaza por cambio climático sobre la dimensión **riesgo de desastre por inundaciones de larga duración** para el periodo 2041-2060 (arriba) y 2081-2100 (abajo) en los escenarios climáticos SSP 2-4.5 (izquierda) y SSP 3-7.0 (derecha).

IV.3.2. Amenaza por cambio climático sobre la dimensión riesgo de desastre por incendios forestales

La amenaza por cambio climático en la dimensión riesgo de desastre por incendios forestales, estimada por el grado de aumento de área con susceptibilidad ante este fenómeno, se presenta en la figura IV.14.



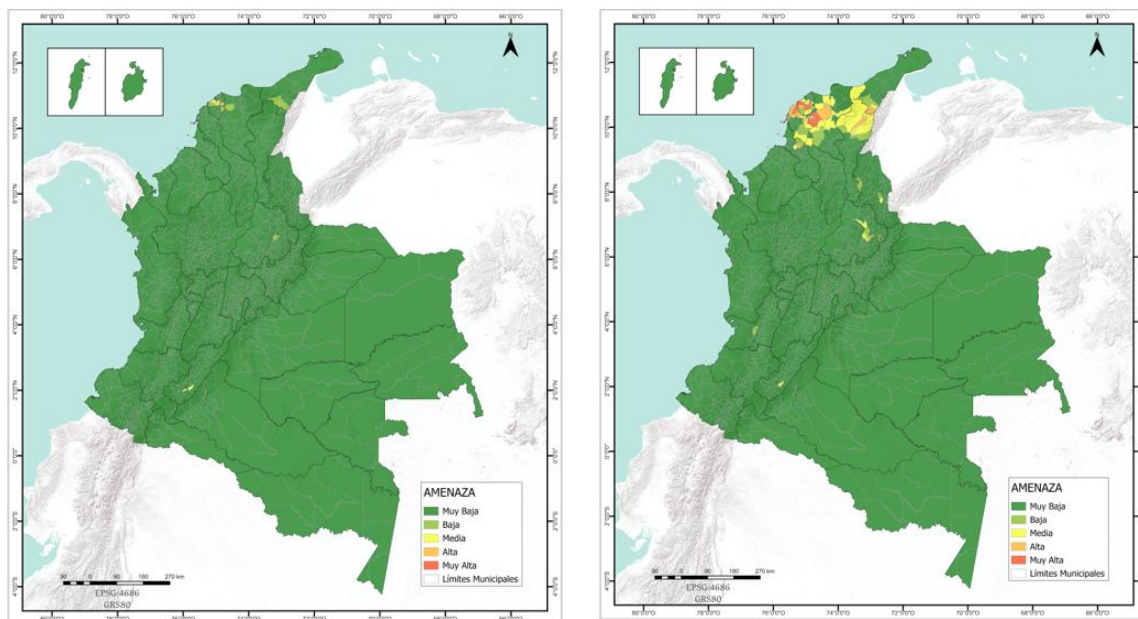


Figura IV.14. Amenaza por cambio climático sobre la dimensión **riesgo de desastre por incendios forestales** para el periodo 2041-2060 (arriba) y 2081-2100 (abajo) en los escenarios climáticos SSP 2-4.5 (izquierda) y SSP 3-7.0 (derecha).

Como es posible apreciar en la Figura IV.14, en el periodo 2041-2060, en el escenario SSP2-4.5, la amenaza en general se mantiene baja en la mayoría de las regiones, con focos de alta y muy alta amenaza especialmente en la región Caribe y sectores de la región Andina. Bajo el escenario SSP3-7-0, la región Caribe, a mediados y a finales de siglo, tendría más municipios con amenaza alta y muy alta, particularmente en los departamentos de Sucre, Bolívar, Magdalena, Cesar y La Guajira.

IV.4. Amenaza por cambio climático sobre la dimensión infraestructura

A continuación, se presentan los resultados de los análisis de amenaza, vulnerabilidad territorial y riesgo por municipios, para los componentes del Sector eléctrico, Minero e Hidrocarburos, y las vías.

IV.4.1. Amenaza por cambio climático en la dimensión de infraestructura del Sector eléctrico

En la Figura IV.15 y la Figura IV.16 se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición a la inundación en el sector eléctrico para generación y transporte, en donde se identifican municipios en los departamentos de Santander, Valle del Cauca, Cauca, Cundinamarca, Córdoba, Meta, Sucre, Antioquía, Risaralda y Casanare en amenaza muy alta.

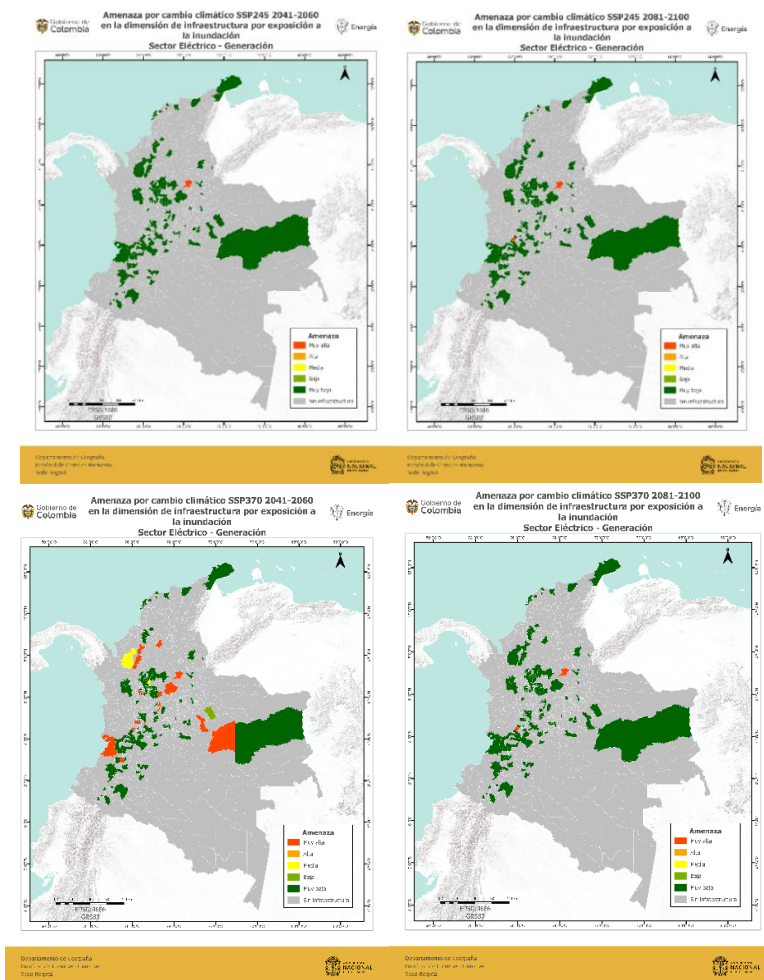


Figura IV.15 Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a la inundación en el Sector eléctrico -Generación

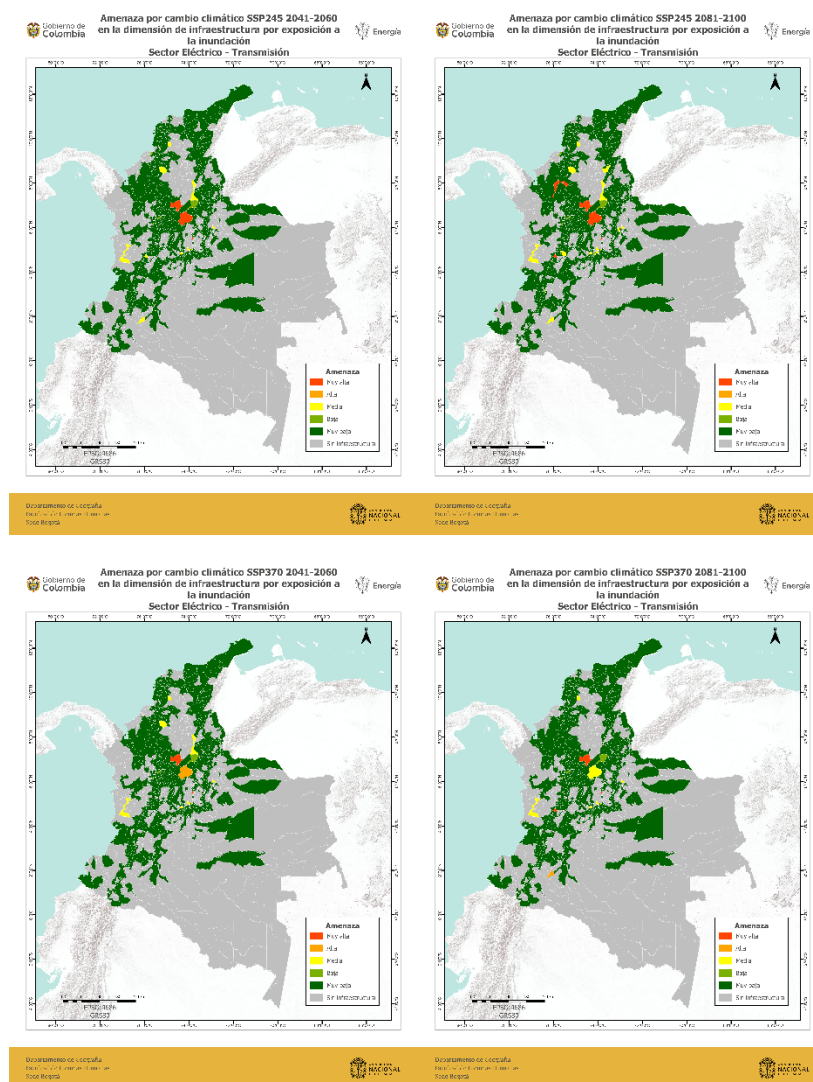


Figura IV.16 Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a la inundación en el Sector eléctrico -Transmisión

En las Figura IV.17 y Figura IV. se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición a los deslizamientos en el sector eléctrico para generación y transporte, en donde se identifican municipios en los departamentos de Antioquía, Córdoba y Boyacá en amenaza muy alta.

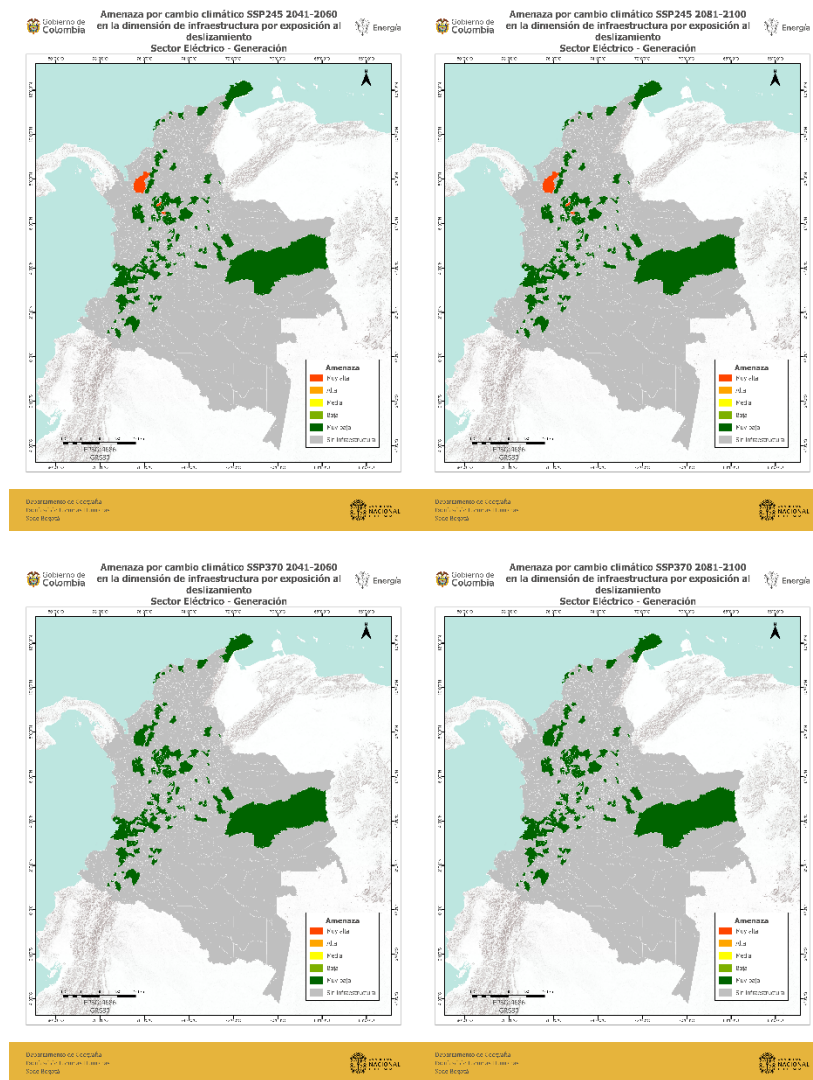


Figura IV.17 Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los deslizamientos en el Sector eléctrico -Generación

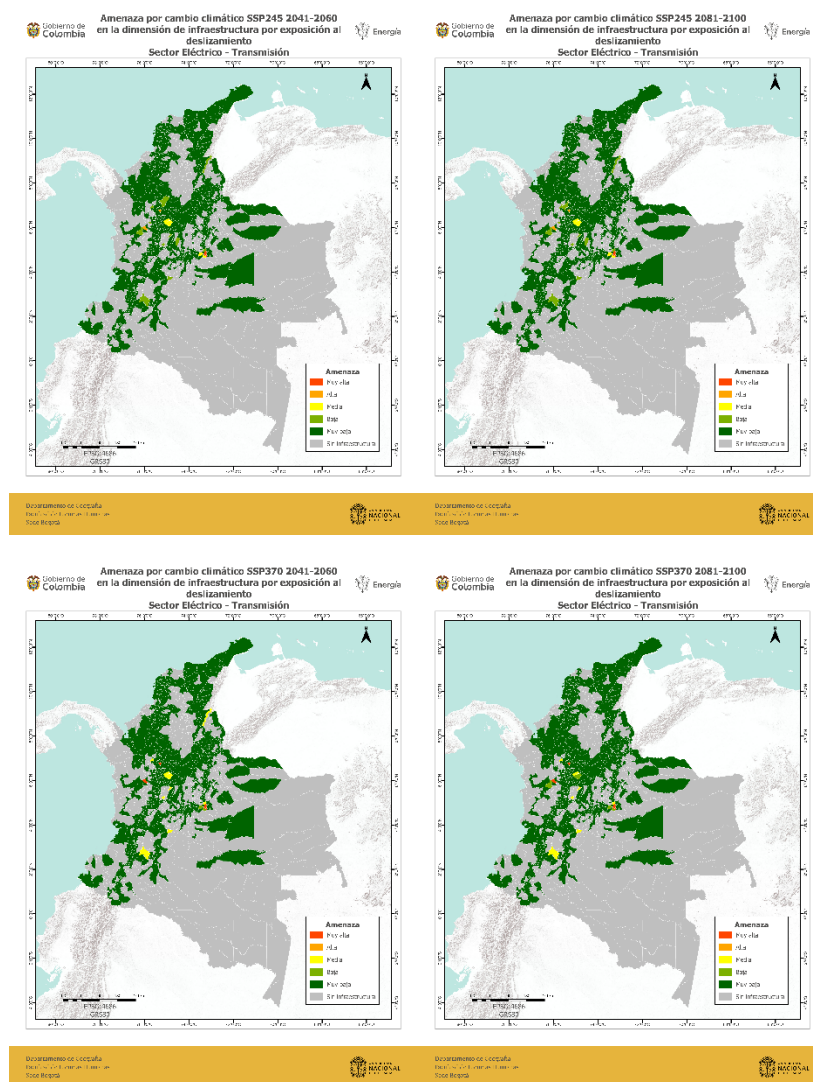


Figura IV.18 Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los deslizamientos en el Sector eléctrico -Transmisión

En la Figura 19 y Figura se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición a los incendios en el sector eléctrico para generación y transporte, en donde se observan municipios en los departamentos de Cundinamarca, Cauca, Boyacá, Atlántico, Córdoba, La Guajira y Bolívar en amenaza muy alta.

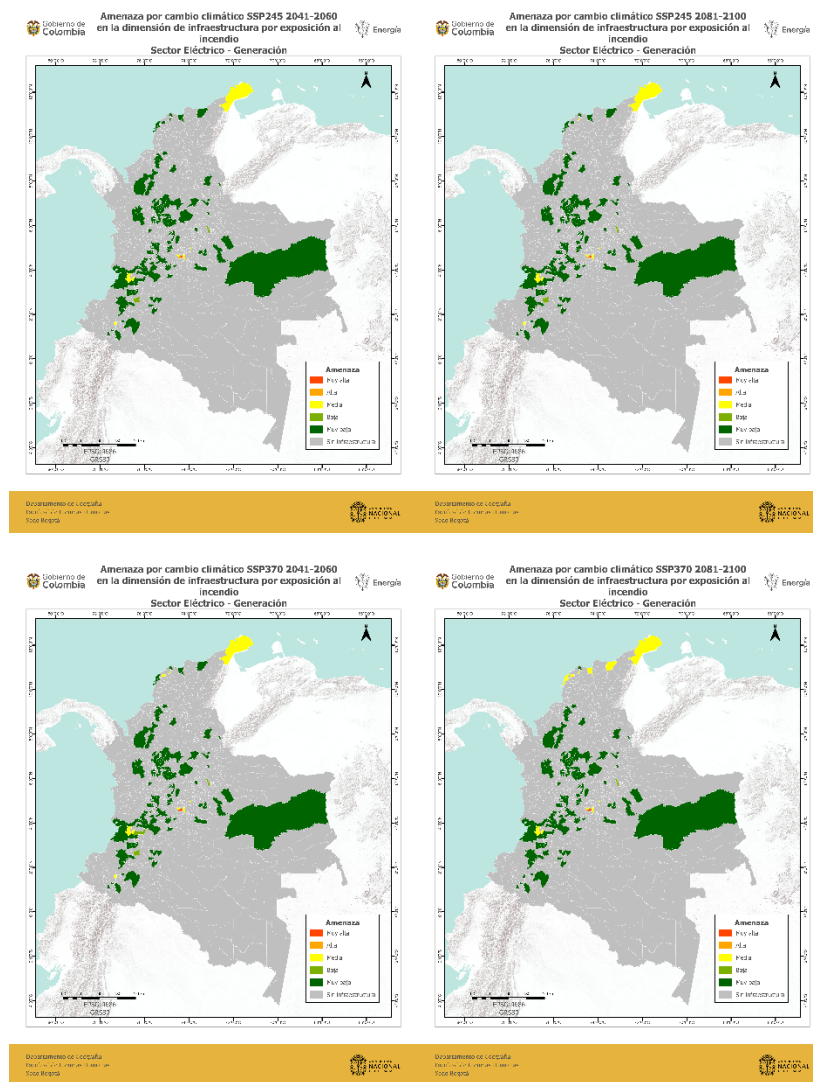


Figura IV.19 Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los incendios en el Sector eléctrico -Generación

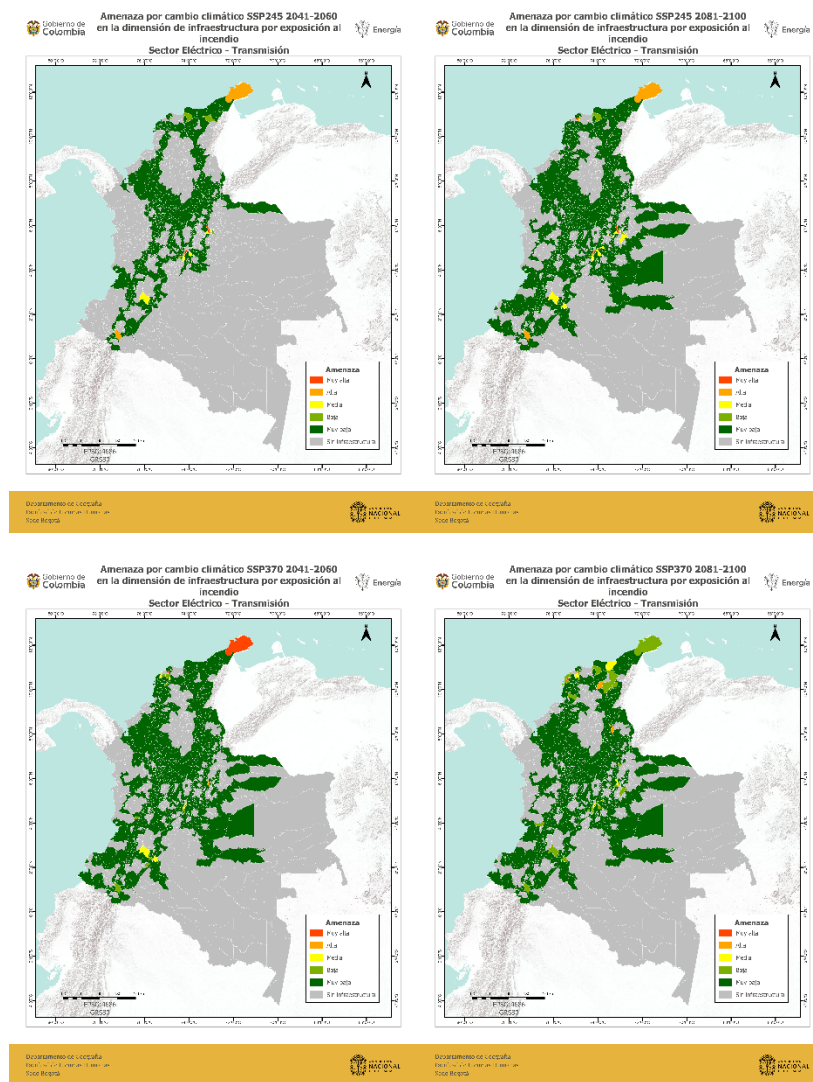


Figura IV.20 Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los incendios en el Sector eléctrico - Transmisión

Amenaza por cambio climático en la dimensión de infraestructura del Sector Minero

En las Figura IV.21 y Figura IV.22 se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición a la inundación en el sector minero para producción y transporte, en donde se observan municipios en los departamentos de Chocó, Bolívar, Cundinamarca y Magdalena en amenaza muy alta.

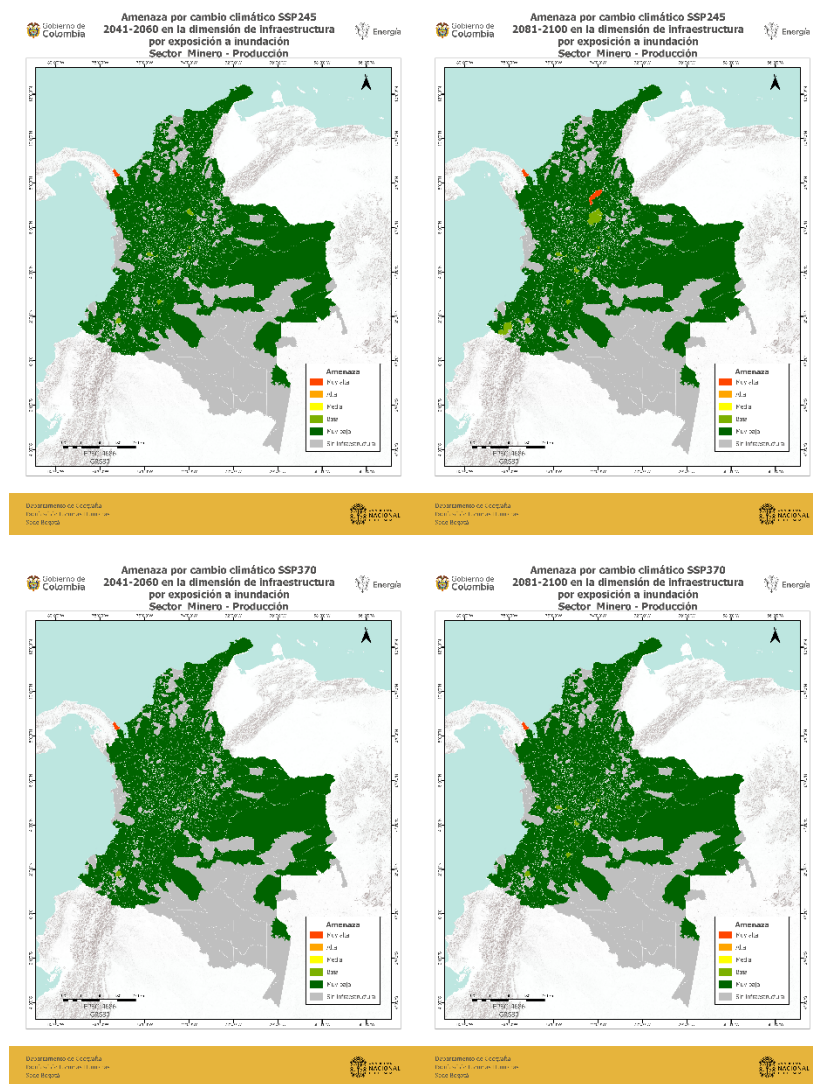


Figura IV.21. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los inundación en el Sector minero – Producción

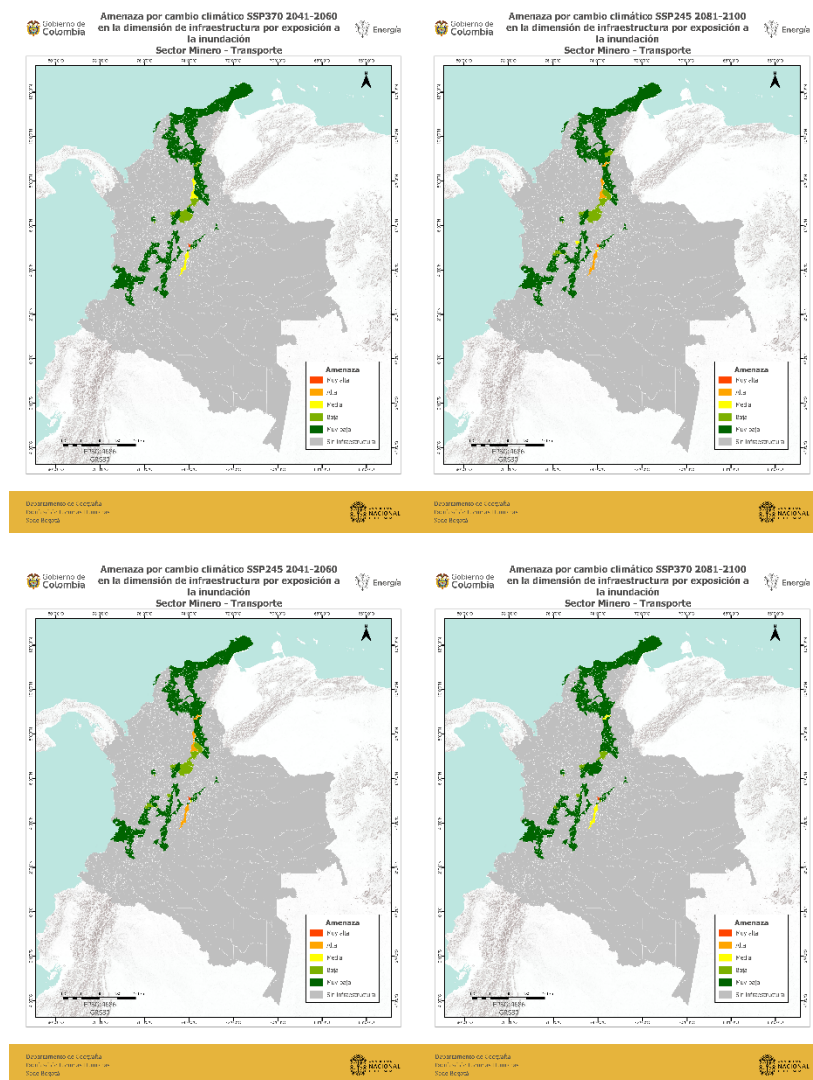


Figura IV.22 Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a la inundación en el Sector minero – Transporte

En la Figura 11 y Figura 12 se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición a los deslizamientos en el sector minero para producción y transporte, en donde se observan municipios en los departamentos de Cundinamarca, Nariño, Bolívar, Antioquía, Risaralda, y Valle del Cauca en amenaza muy alta.

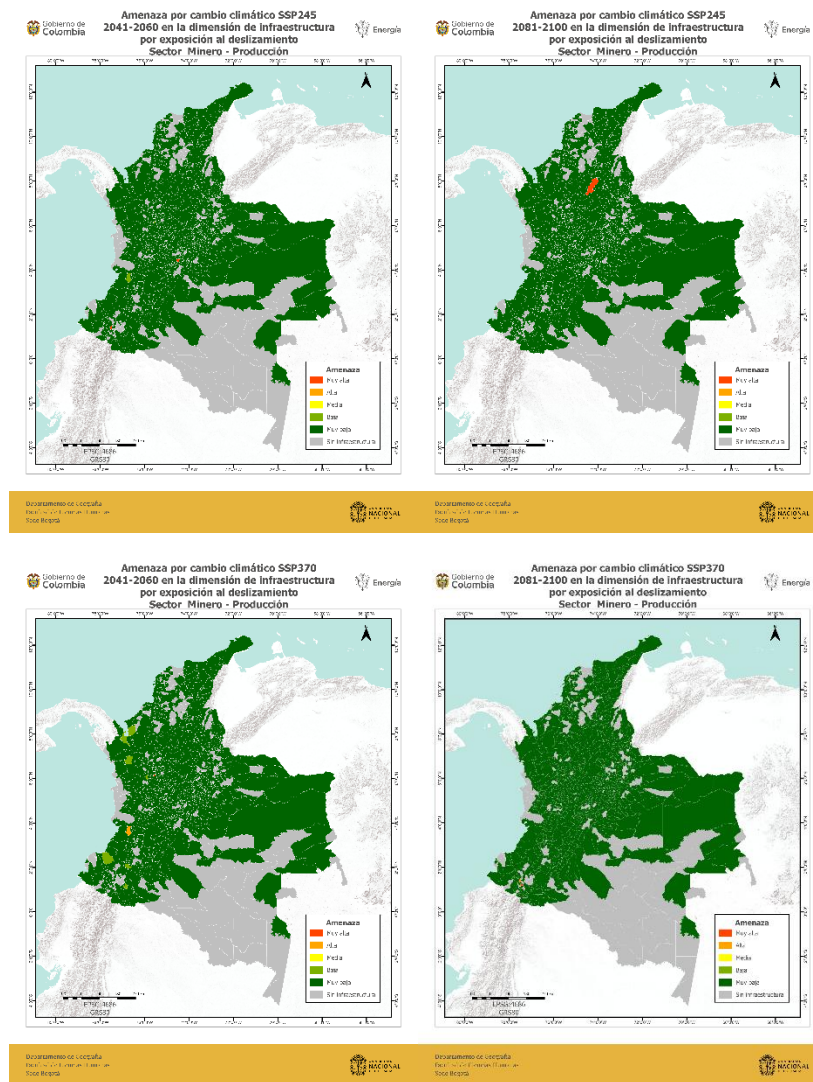


Figura 11 Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los deslizamientos en el Sector minero – Producción

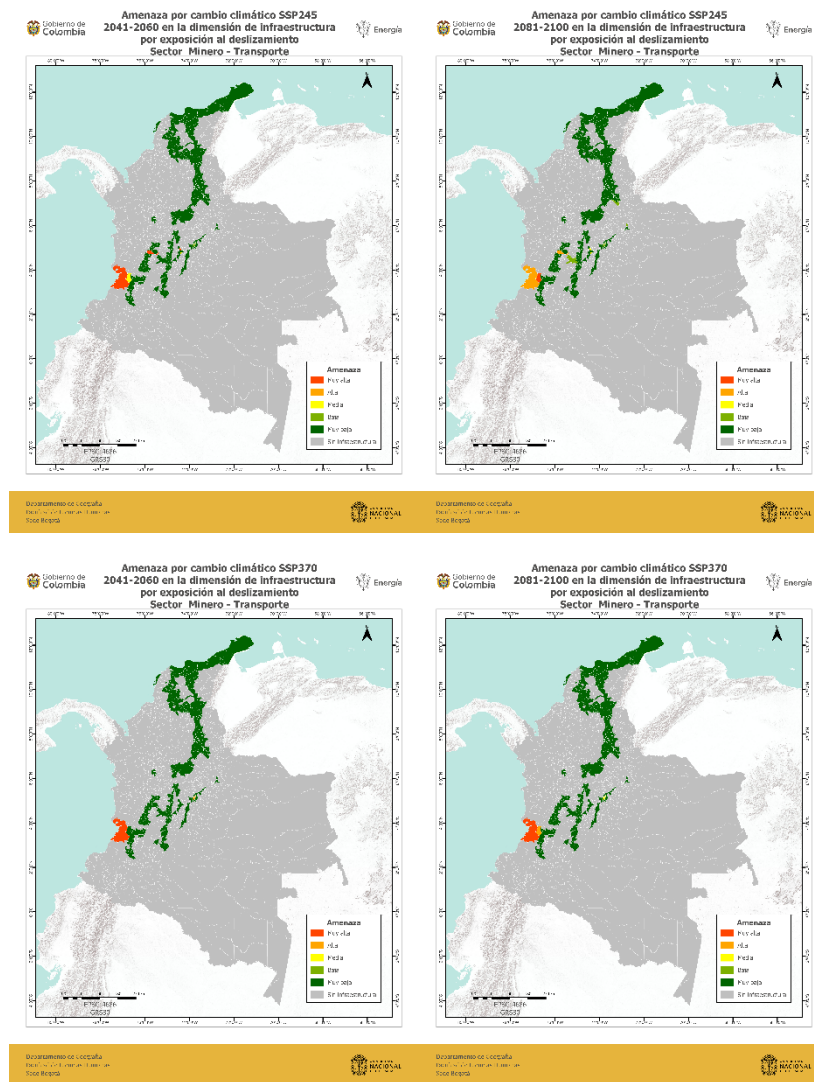


Figura 12. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los deslizamientos en el Sector minero – Transporte

En las Figura IV.25 y Figura 13 se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición a los incendios en el sector minero para producción y transporte, respectivamente; en estas se observa municipios en los departamentos de Cundinamarca, Nariño, Valle del Cauca, Huila, Sucre, Bolívar, Atlántico, Norte de Santander, Magdalena y La Guajira en amenaza muy alta.

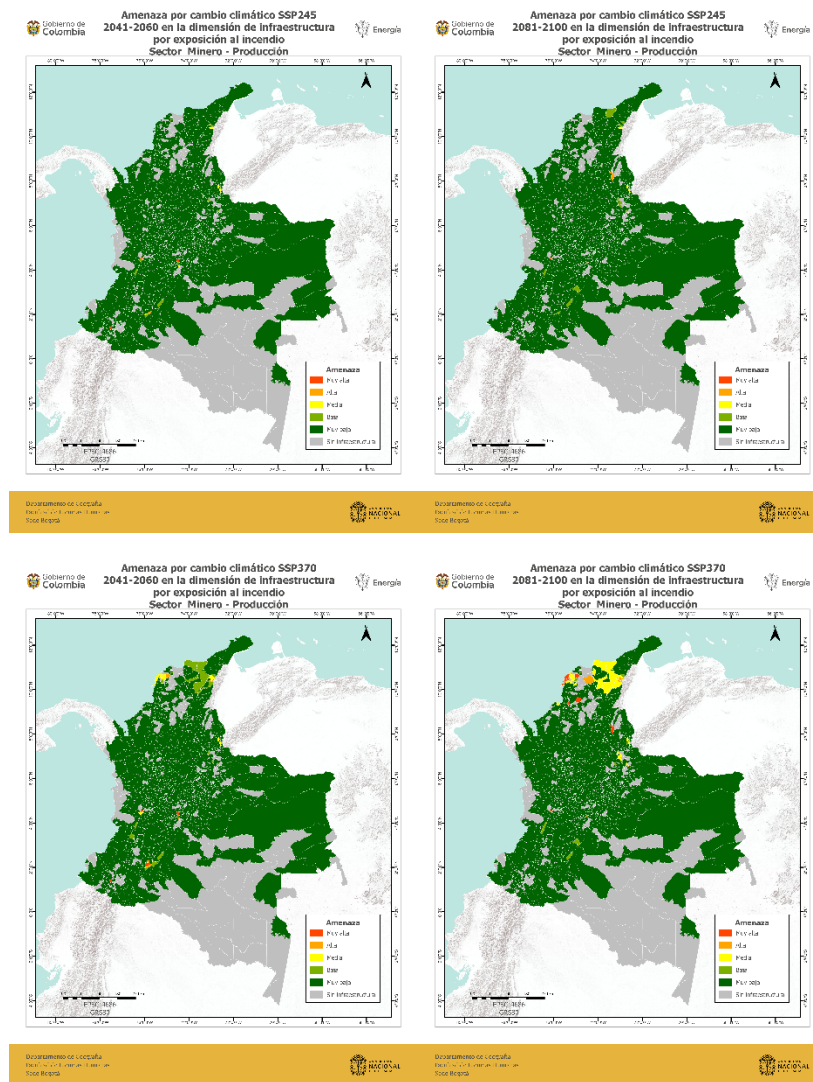


Figura IV.25. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los incendios en el Sector minero – Producción

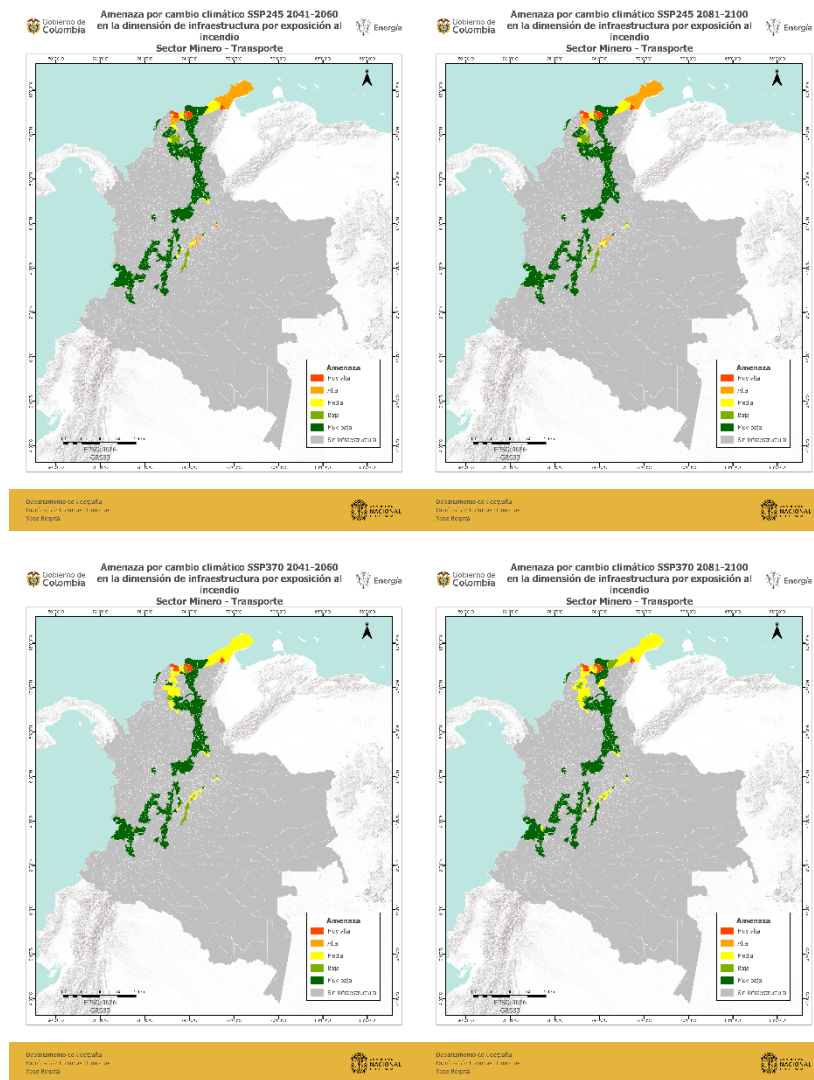


Figura 13. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los incendios en el Sector minero – Transporte

Amenaza por cambio climático en la dimensión de infraestructura del Sector Hidrocarburos

En las Figura a la Figura 15IV.29 se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición a la inundación en el sector hidrocarburos para exploración, producción y transporte, en donde se observan municipios en los departamentos de Sucre, Huila, Córdoba, Antioquía, Cundinamarca, Santander en amenaza muy alta.

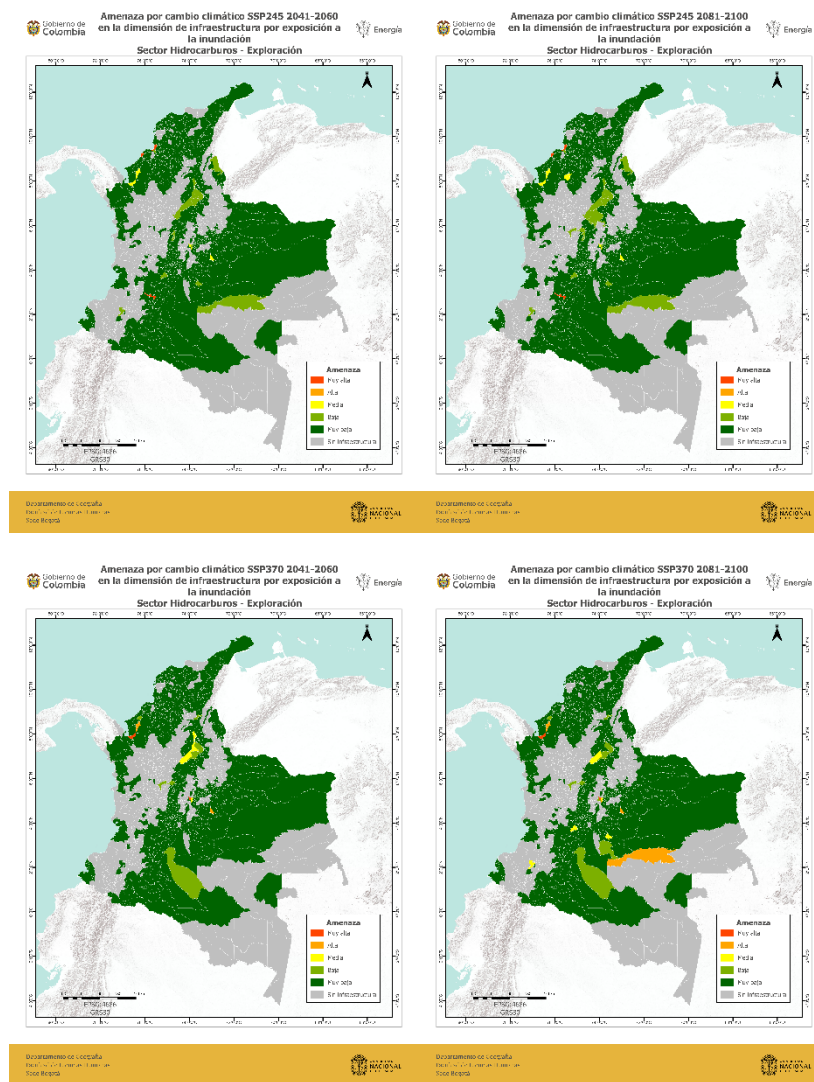


Figura IV.27. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a la inundación en el Sector hidrocarburos – Exploración

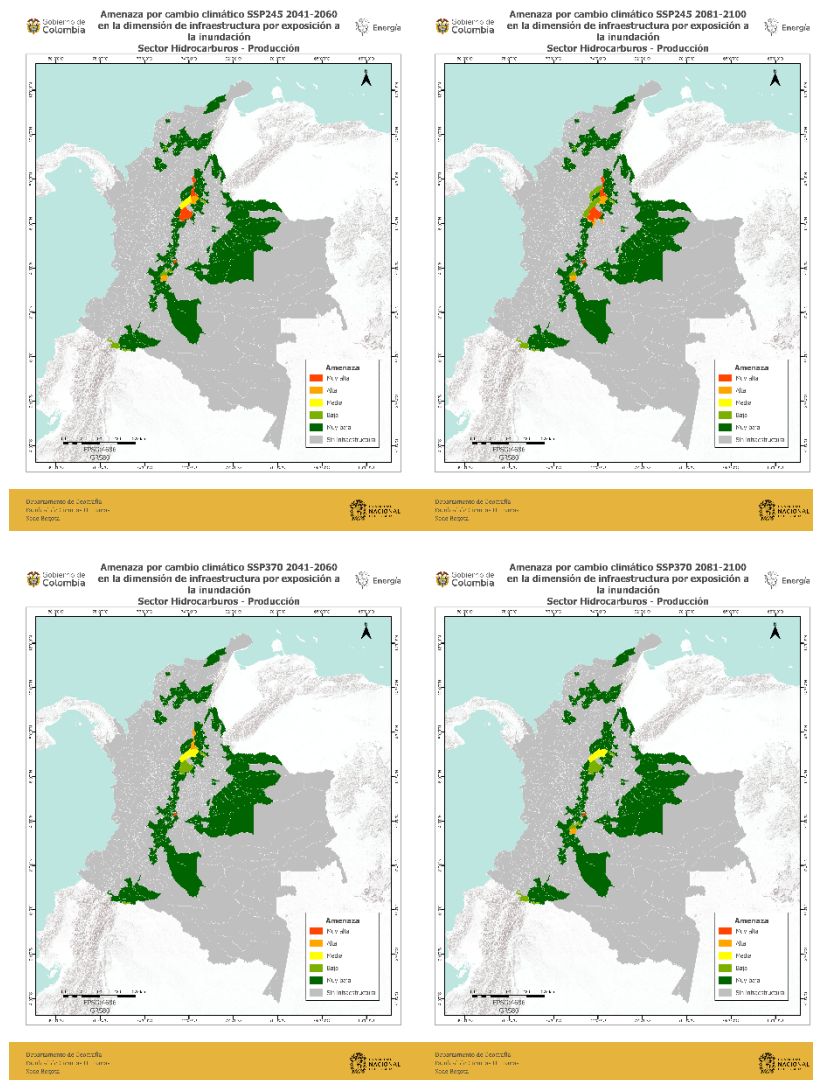


Figura 14. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a la inundación en el Sector hidrocarburos – Producción

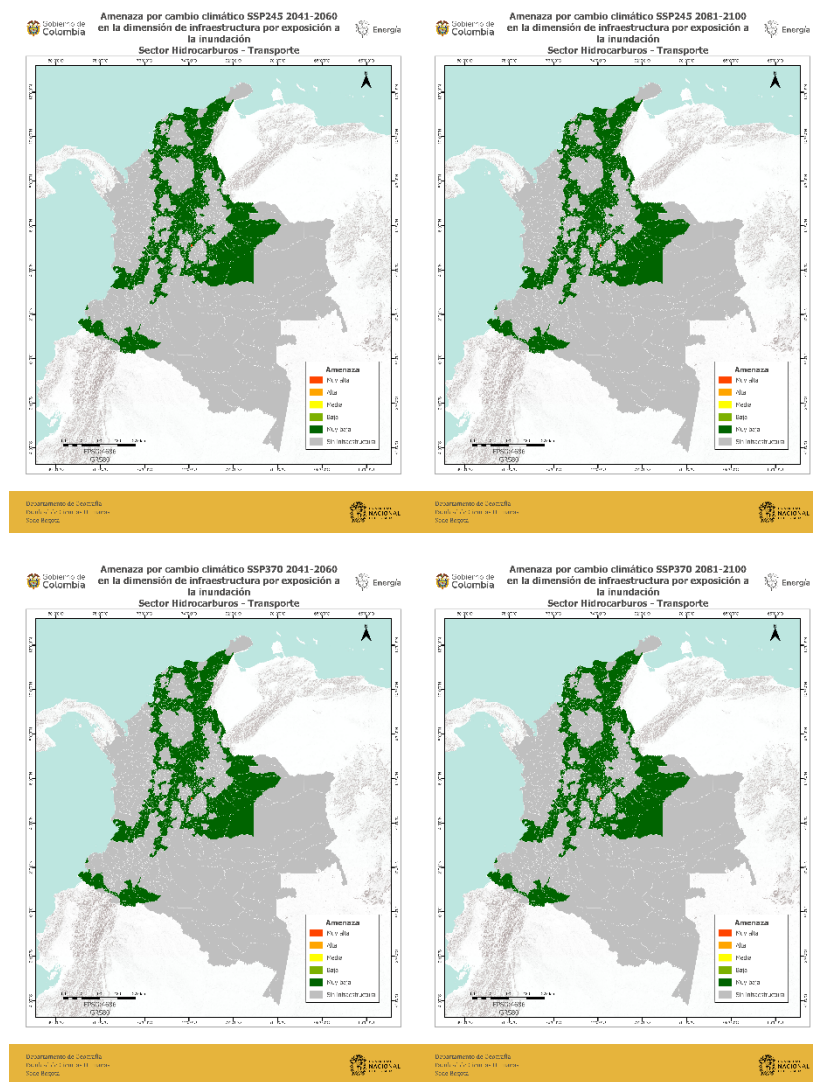


Figura 15. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a la inundación en el Sector hidrocarburos – Transporte

En las Figura IV.30 a la Figura IV.32 se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición a los deslizamientos en el sector hidrocarburos para exploración, producción y transporte, en donde se observan municipios en los departamentos de Tolima, Boyacá, Putumayo, Cauca, Norte de Santander, Tolima, Nariño, Cundinamarca y Valle del Cauca, en amenaza muy alta.

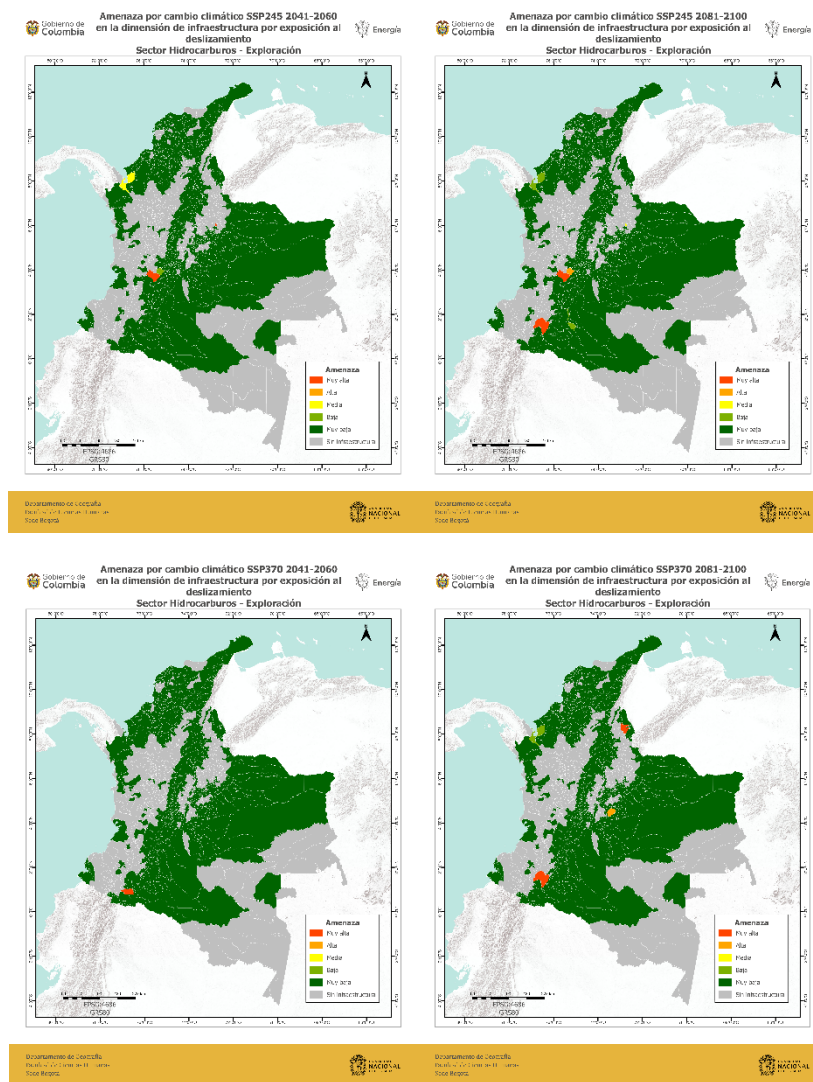


Figura IV.30. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los deslizamientos en el Sector hidrocarburos – Exploración

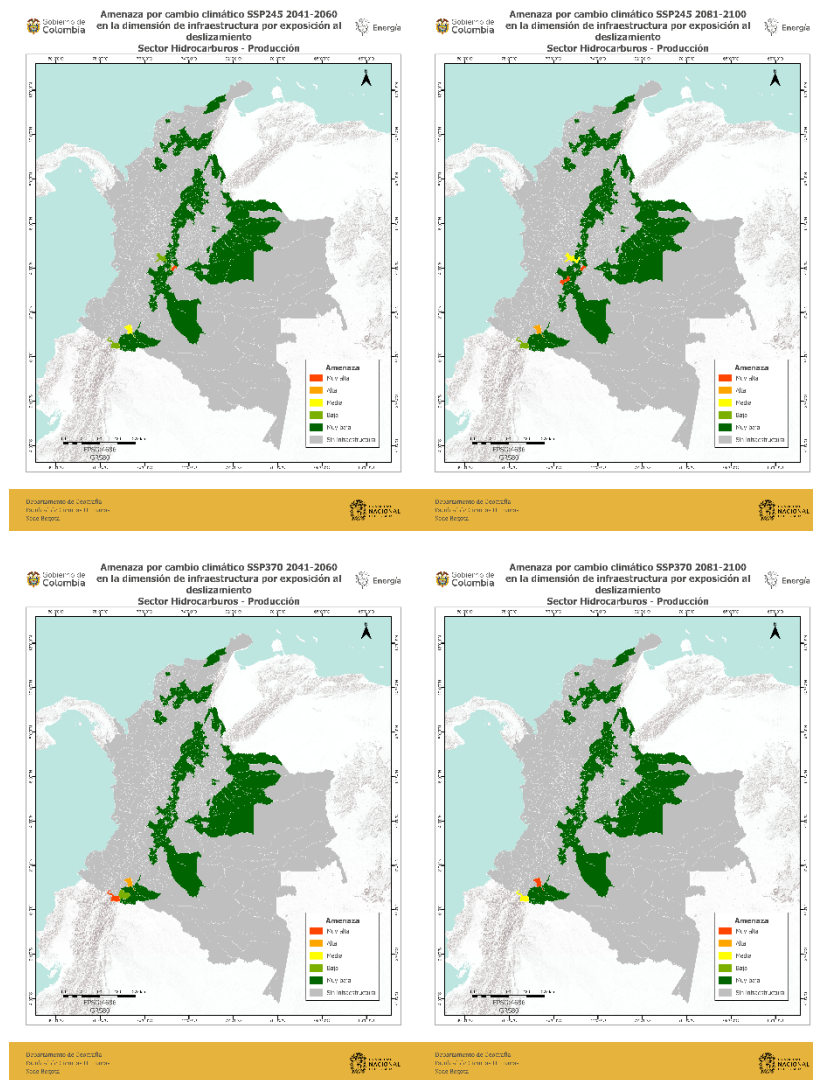


Figura IV.31. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los deslizamientos en el Sector hidrocarburos – Producción

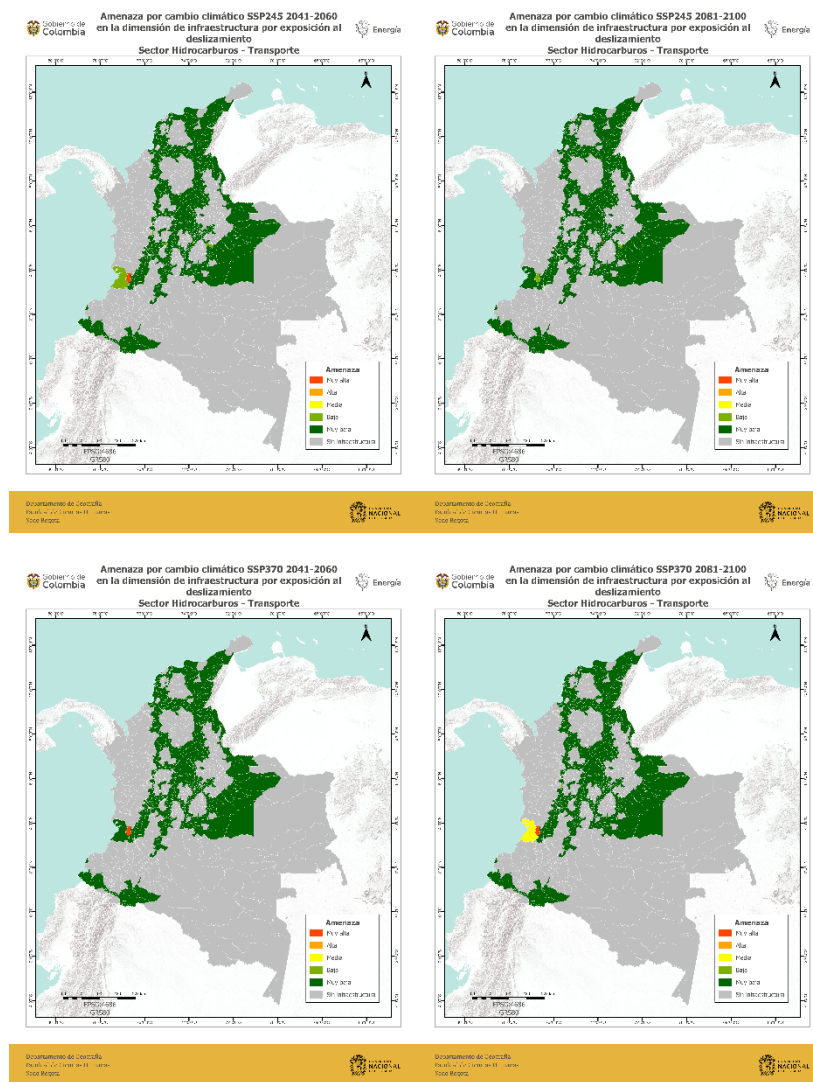


Figura IV.32. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los deslizamientos en el Sector hidrocarburos – Transporte

En las a la Figura IV.33 a la Figura IV.35 se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición a los incendios en el sector hidrocarburos para exploración, producción y transporte, en donde se observan municipios en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Atlántico, Bolívar y Huila en amenaza muy alta.

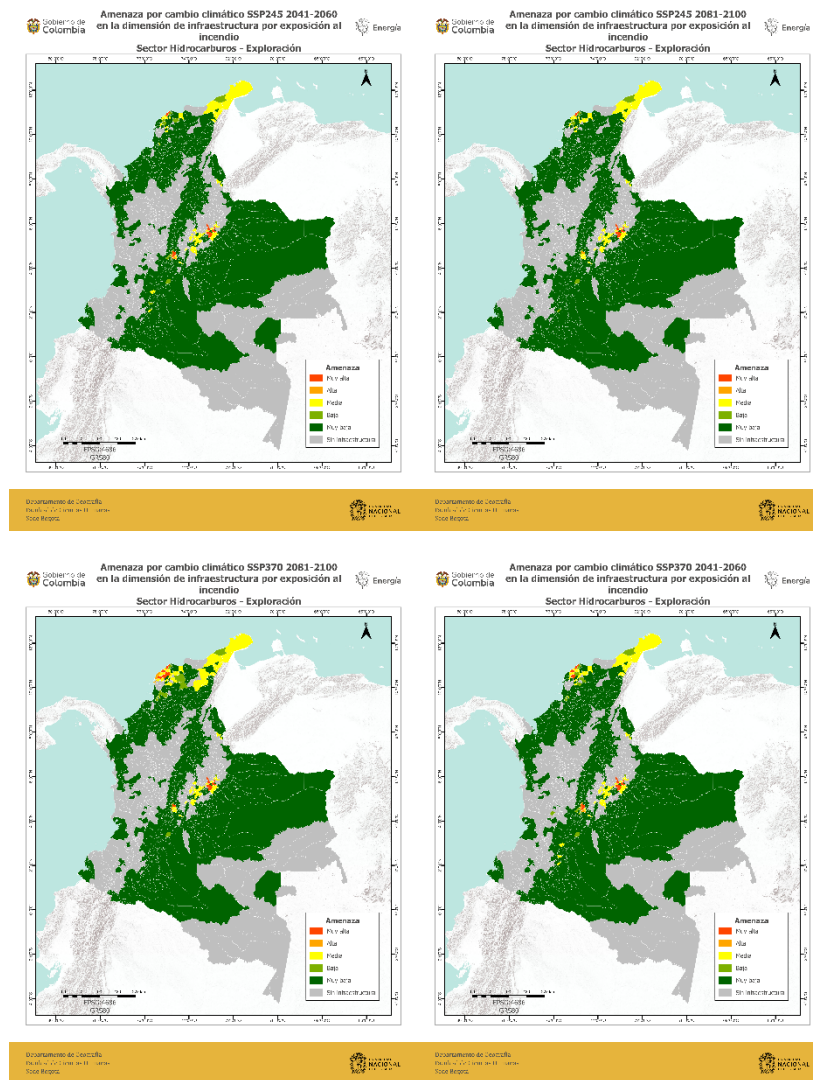


Figura IV.33. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los incendios en el Sector hidrocarburos – Exploración

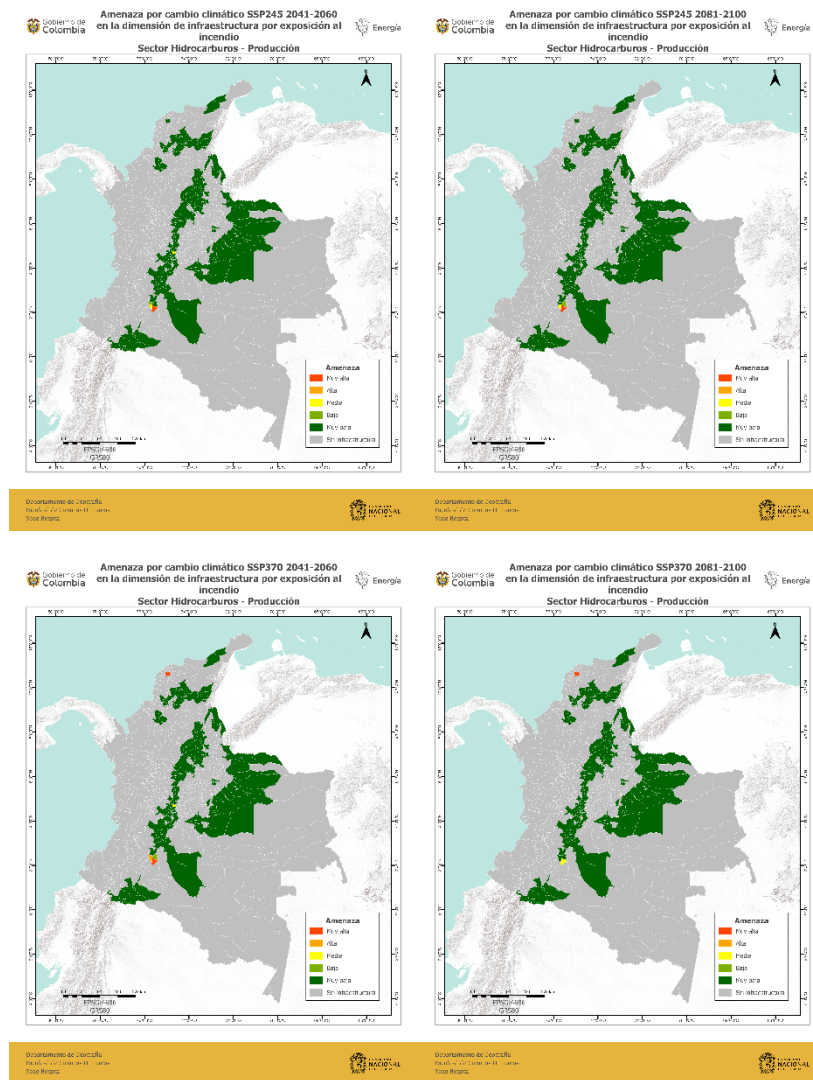


Figura IV.34. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los incendios en el Sector hidrocarburos – Producción

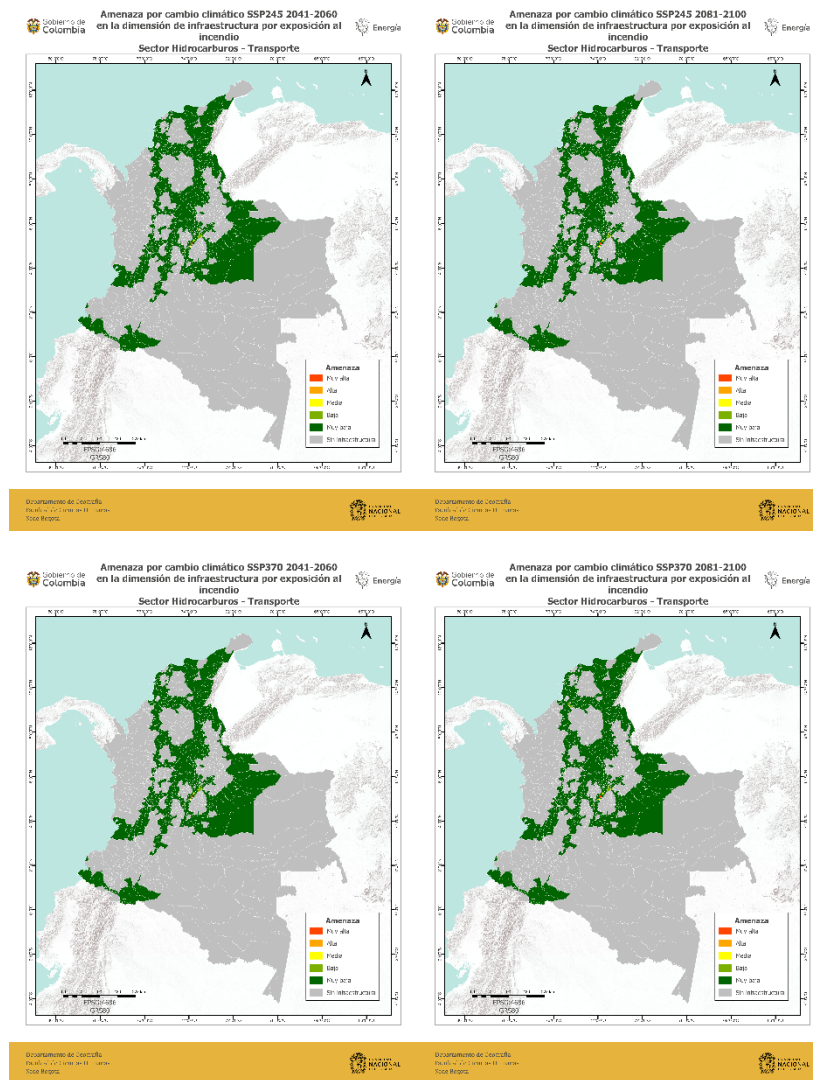


Figura IV.35. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los incendios en el Sector hidrocarburos – Transporte

Amenaza por cambio climático en la dimensión de infraestructura del Sector vías

En la Figura IV.36 se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición de vías terrestres a inundación, en donde se observan municipios en los departamentos de Chocó (Urabá), Santander y Sucre en amenaza alta y muy alta.

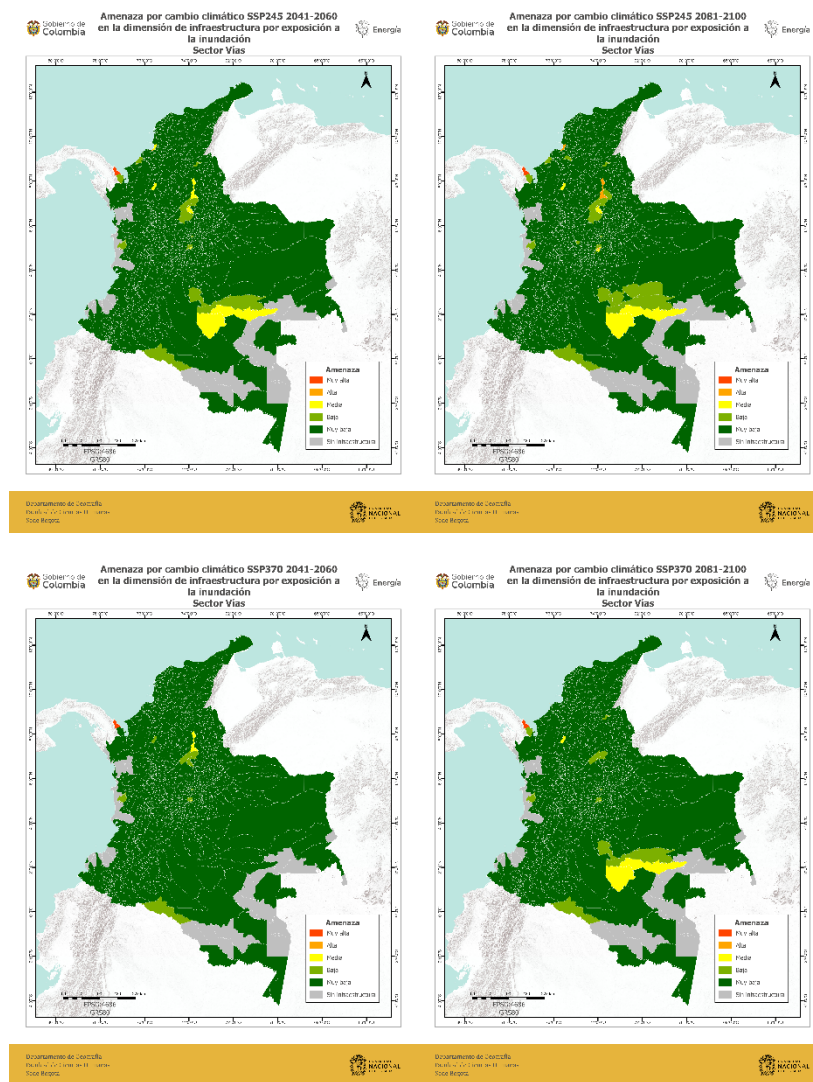


Figura IV.36. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición de la infraestructura de vías terrestres a inundación de larga duración

En la Figura IV.37 se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición de las vías terrestres a inundación de larga duración, en donde se observan municipios en el departamento de Nariño en amenaza muy alta.

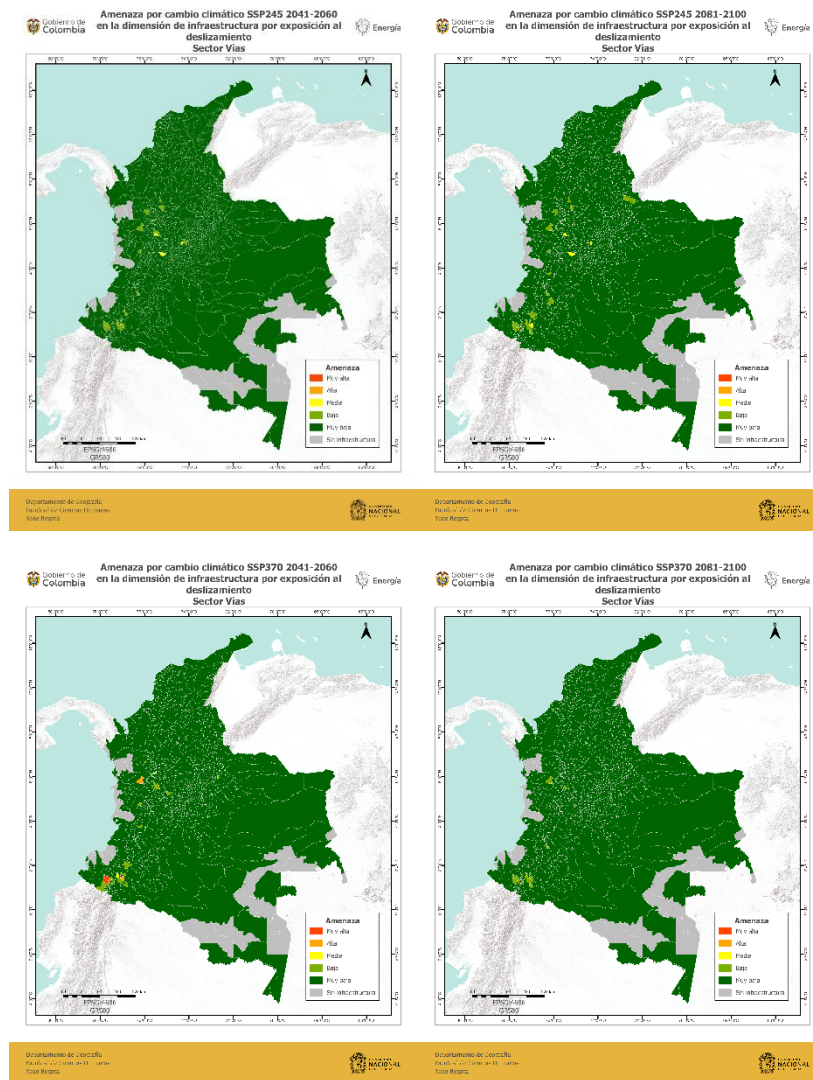


Figura IV.37. Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición de las vías terrestres a los deslizamientos

En la Figura se presenta los mapas de amenaza por cambio climático en los escenarios SSP245 y SSP370 por exposición de la infraestructura vial a los incendios. En general la amenaza es baja, no obstante, se destacan municipios en los departamentos de Huila, Chocó, Atlántico, Magdalena y Bolívar en donde la amenaza sería alta o muy alta.

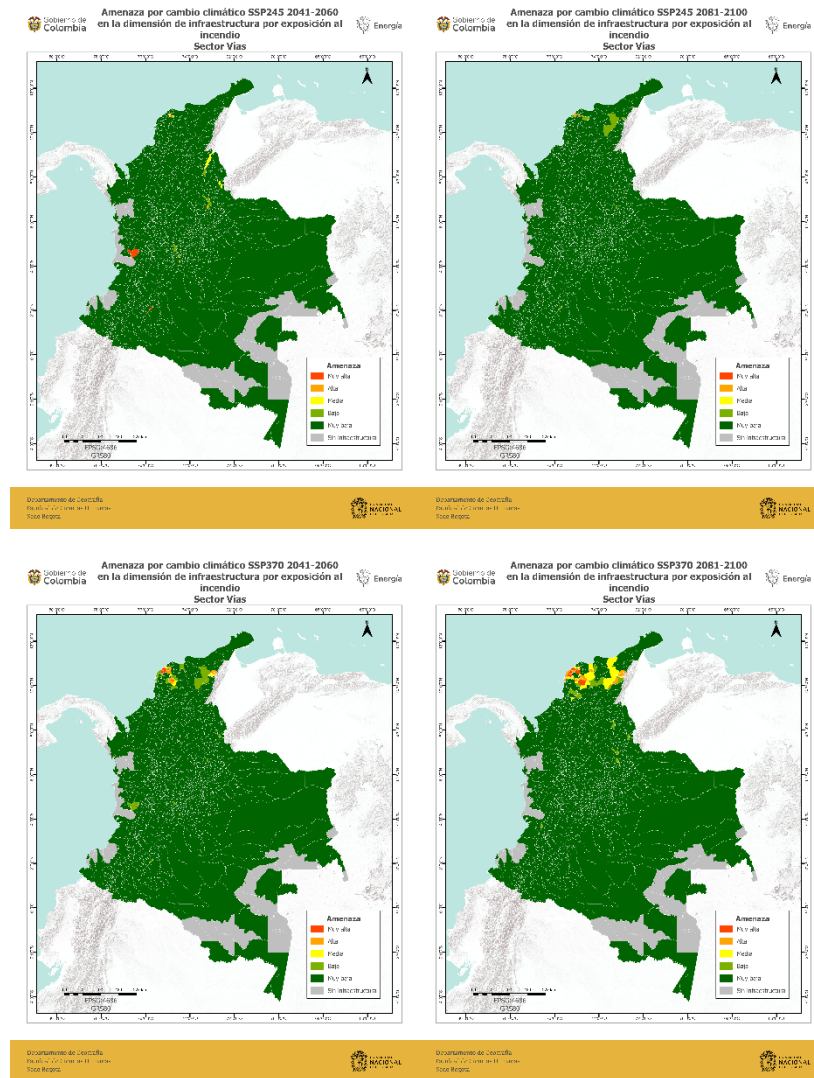


Figura IV.37 Amenaza por cambio climático SSP245 y SSP370 por exposición a los incendios en la dimensión de infraestructura vial.

Bibliografía

- Banco Mundial. (2021). Climate risk and adaptation report. The World Bank Group. <https://www.worldbank.org/en/topic/climatechange/publication/climate-risk-and-adaptation-report>
- BID. (2021). Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: Guía para la acción. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/es/cambio-climatico-y-desarrollo-en-america-latina-y-el-caribe-guia-para-la-accion>

Corficolombiana. (2022). Informe sectorial: Sector eléctrico.

<https://investigaciones.corficolombiana.com/documents/38211/0/Informe%20Sectorial%20Sector%20Electrico%2015072022ff.pdf/f3ae4acf-aa95-0c15-a066-6cb36966fe3c>

IDEAM, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, PNUD, DNP, y Cancillería de Colombia. (2017). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21131/TCNCC_2017.pdf

IEA. (2022). Climate resilience for energy security. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/climate-resilience-for-energy-security>

IPCC. (2022a). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC. (2022b). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC. (2023). AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

ISO. (2019). ISO 14090:2019 - Adaptation to climate change - Principles, requirements and guidelines. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/68507.html>

Minambiente. (2017). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/plan-nacional-de-adaptacion-al-cambio-climatico/>

UNOPS. (2021). Infraestructura para la acción climática. United Nations Office for Project Services. <https://www.unops.org/es/news-and-stories/news/infrastructure-for-climate-action>

UPME. (2013). Vulnerabilidad y las opciones de adaptación del sector energético colombiano frente al cambio climático. Unidad de Planeación Minero Energética. https://www1.upme.gov.co/Paginas/Estudios_recientes/Vulnerabilidad-y-las-opciones-de-adaptaci%C3%B3n-del-sector-energ%C3%A9tico-colombiano-frente-al-cambio-clim%C3%A1tico.aspx