



**Clima-LoCa**

Formentar innovaciones relevantes para el clima y bajas en cadmio para mejorar la resiliencia y la inclusividad de la cadena de cacao en Colombia, Ecuador y Perú.



# Cambio climático y cacao en Ecuador



**Christian Bunn**

**Fabio Castro-Llanos**

Junio 2021

Este documento se desarrolló en el marco del proyecto Fomentar innovaciones relevantes para el clima y bajas en cadmio para mejorar la resiliencia y la inclusividad de la cadena de cacao en Colombia, Ecuador y Perú (Clima-LoCa) financiado por financiado por la Comisión Europea (CE). El proyecto aborda importantes desafíos relacionados con la resiliencia, la competitividad y la inclusión de los sectores del cacao en crecimiento.

**Acerca de los autores:**

Christian Bunn y Fabio Castro-Llanos trabajan en la Alianza de Bioversity Internacional y CIAT.

**Autor para correspondencia:** Christian Bunn, [c.bunn@cgiar.org](mailto:c.bunn@cgiar.org)

**Exención de Responsabilidad**

La presente publicación ha sido elaborada con el apoyo de La Unión Europea. Su contenido es responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente refleja los puntos de vista de la Unión Europea.

# Índice

1. Introducción .....	5
1.1. Estado del arte.....	6
1.2. Zonas agroclimáticas.....	7
1.3. Zonas de gradiente de impacto.....	7
2. Datos y metodología .....	8
2.1. Método / Metodología.....	8
2.2. Datos climáticos y de presencias de cacao.....	9
3. Resultados .....	11
3.1. Cambio climático en la región .....	11
3.2. Comportamiento de las ZAC .....	12
3.3. Probabilidad de idoneidad.....	16
3.4. Gradiente de impacto .....	17
3.5. Incertidumbre de modelos de cambio climático .....	19
4. Discusión.....	20
4.1. Área idónea versus área cultivada.....	20
4.2. Comparación entre distintos modelos .....	21
4.3. Idoneidad del cultivo de cacao versus altitud .....	21
5. Validación con expertos.....	23
6. Conclusiones .....	24
7. Bibliografía .....	25

## Lista de figuras

Figura 1. Área cosechada de cacao entre el 2000 y el 2018. Adaptado de FAO (2020).....	5
Figura 2. Flujograma de trabajo. Recuadro en rojo ilustra que en este caso se hizo para Ecuador. ....	8
Figura 3. Presencias y pseudoausencias del cultivo de cacao en Ecuador.....	10
Figura 4. Cambios en la temperatura y la precipitación entre la línea base y el periodo 2070s - RCP 6.0 Promedio de modelos.....	11
Figura 5. Diferencias para las variables de temperatura y precipitación .....	12
Figura 6. Zonas agroclimáticas para el cultivo del cacao en Ecuador. ....	13
Figura 7. Zonas agroclimáticas para los distintos periodos de tiempo (izq) Línea base (cen) 2040 - 2060 (der) 2060 - 2080. ....	15
Figura 8. Climatograma para los distintos puntos de presencia de cacao por ZAC.....	16
Figura 9. Idoneidad probabilística del cultivo de cacao en Ecuador bajo los tres distintos periodos de tiempo. (Izq) Línea base (Cen) 2050s (Der) 2070s.....	17
Figura 10. Zonas de gradiente de impacto para el cacao. ....	17
Figura 11. Áreas de gradiente de impacto para la línea base vs 2050s y línea base vs 2070s. ....	18
Figura 12. ZAC para los GCMs climáticos extremos en el periodo 2070s.....	19
Figura 13. Área cosechada de cacao. Adaptado del Ministerio de Agricultura y Ganadería (2019). ....	20
Figura 14. Comparación de modelos de idoneidad para el cacao bajo la línea base (fila superior) y el clima futuro (fila inferior). ....	21
Figura 15. Idoneidad versus altitud; líneas en color gris son los distintos GCM.....	22

## 1. Introducción

Según datos de FAOSTAT (2018), Ecuador está dentro de los 10 países con mayor producción de cacao a nivel mundial, esto para los últimos 18 años de los que se tiene registro (entre 2000 y 2018). El país se ubica en la posición 9 con un poco más de 350,000 ha (hectáreas) cultivadas en promedio desde el año 2000 hasta el 2018. En la siguiente Figura 1 se ilustra el comportamiento del área cosechada en Ecuador, esto según datos de la FAO.

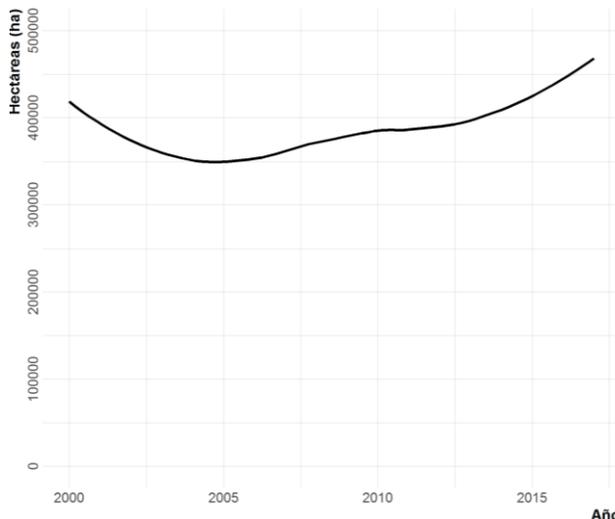


Figura 1. Área cosechada de cacao entre el 2000 y el 2018. Adaptado de FAO (2020).

El área cosechada desde el año 2005 ha venido aumentando considerablemente, al punto que se tienen más de 450,000 ha cultivadas en el año 2018. Esto permite ver que el cacao ha venido teniendo cada vez más auge e importancia agrícola y económica en el país.

En este sentido, prever qué va a pasar a futuro con el cacao desde la perspectiva climática es muy importante para la economía del país y miles de familias que subsisten del cacao, por esto, el objetivo principal del presente documento es mostrar la magnitud del impacto del cambio climático sobre el cultivo de cacao identificado en Ecuador. Es decir, se busca identificar dónde el cacao va a ser más resiliente al cambio climático, y conocer si los municipios en donde actualmente se cultiva cacao, a futuro tendrían las condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo, esto a partir de la identificación de Zonas Agroclimáticas (ZAC) para el cacao.

Con estas ZAC se podría apoyar a los actores cacaoteros en el desarrollo de una planeación prospectiva estratégica, con miras a tener la seguridad alimentaria del cacao a largo plazo. Para identificar dichas zonas idóneas y guiar la adaptación al cambio climático del cacao se tomó como referencia la línea de escenario climático intermedio llamado RCP 6.0 para los periodos 2040 – 2060 (2050s en adelante) y 2060 – 2080 (2070s en adelante), con esto se tendrían dos miradas, tanto a mediano como a largo plazo sobre dónde sería posible cultivar cacao según estas proyecciones climáticas; paralelamente se estiman las zonas de gradiente de impacto que indican las diferencias en idoneidad identificadas con las ZAC.

Este informe hace parte del proyecto Clima – LoCa que tiene como propósito fomentar innovaciones relevantes para el clima y bajas en cadmio para mejorar la resiliencia y la inclusividad de la cadena de cacao en Colombia, Ecuador y Perú.

## 1.1. Estado del arte

Según consultas realizadas en motores de búsqueda de artículos científicos como Google *Scholar*, *Science Direct* y *Scopus* se concluye que no hay investigaciones, hasta la fecha, relacionadas con el impacto del cambio climático sobre el cultivo de cacao a nivel nacional para Ecuador. La búsqueda se realizó con base en palabras clave, tales como: “*climate change*”, “*cocoa*”, “*crop*”, y “*Ecuador*”.

En el proyecto “Cadenas de valor inclusivas y sostenibles” (Camelia, 2018) se analizan los posibles impactos del cambio climático sobre los cultivos de café, quinoa y cacao, esto en las provincias de Manabí, Napo, Orellana, Sucumbíos y Chimborazo localizados al centro y norte del país; la metodología empleada en este estudio incluyó el análisis de las características de cultivos, fases de desarrollo e intereses con las interacciones entre estas variables climáticas, tomando la recopilación de percepciones y conocimientos sobre buenas prácticas de manejo, buscando la resiliencia ante efectos de cambio climático. Como resultado del estudio se hacen recomendaciones ante el cambio climático, tales como: monitoreo de clima a nivel local, incidencia de plagas y enfermedades, investigación sobre agroecosistemas más resilientes, y monitoreo de las fases fenológicas de los cultivos, entre ellos el cacao.

Este estudio determinó también el producto 3 (Camelia, 2018) sobre la presentación de análisis climático actual y futuro, que utilizó información climática diaria de precipitación y temperatura media, mínima y máxima de tres fuentes principales como, datos observados de estaciones del INAMHI (Instituto nacional de Hidrología y Meteorología del Ecuador), e información generada en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático del Ecuador (MAE & PNUD, 2016); esta sumada a la información primaria recopilada en cada una de las provincias del estudio mediante talleres con actores locales y grupos de expertos, con el fin de obtener sus percepciones climáticas para complementar la información climática de las dos fuentes mencionadas anteriormente (MAE, 2014). Este análisis abordó temáticas como, sequías, heladas, olas de calor y lluvias intensas. Sin embargo, no aborda en particular un análisis climático especial para las zonas donde se cultiva cacao.

De otro lado, David Neira (2016) realiza un análisis de sostenibilidad energética para la exportación del cacao y su influencia en el cambio climático. El objetivo principal del estudio es analizar el metabolismo energético en los sistemas de producción del cacao en Ecuador, y la contribución de este sistema al cambio climático; la producción el transporte y la transformación son las fases del cacao con mayor impacto en el medio ambiente, con 66.45%, 16.1% y 15% de emisiones de gases de efecto invernadero

La investigación titulada “*Climate change and cocoa cultivation*” (Bunn, Castro y Lundy, 2018) aborda el impacto del cambio climático a nivel global para el cacao, y pone un caso práctico para Costa de Marfil, uno de los países de mayor producción del cultivo a nivel mundial. Sus principales resultados sugieren que el cambio climático afectaría mayormente las zonas sur-oeste y sur-este del país, mientras que la zona centro-sur del país mantendría idoneidad constante para el cultivo de cacao.

En otros estudios se ha analizado el impacto del cambio climático sobre el cacao en otras partes del mundo, como el de Bunn et al (2019) quienes analizan en cuáles zonas se podría cultivar cacao de cara al futuro para el país de Ghana. Entre sus principales hallazgos se tiene que en gran parte del territorio donde se cultiva cacao habrá un impacto tipo “resiliencia sistémica”, es decir, en estas zonas se deberían implementar ciertas medidas de manejo agrícola del cacao que permitan su resiliencia al cambio en el clima.

En otro estudio en África también se realizó un análisis del cambio climático sobre toda la región cacaotera del oeste de dicho continente que fue liderado por Schroth et al., (2016), quienes concluyen que la zona sur de este corredor es la más idónea para el cacao y por ende la que sufriría menos cambios a futuro.

En este sentido se destacan estudios que evalúan las condiciones climáticas que tendría el cacao a futuro en algunos países / regiones. Sin embargo, hay una brecha en conocimiento académico/investigativo sobre las zonas idóneas para el cacao en Ecuador, desde una perspectiva de amenaza climática haciendo uso del quinto informe de cambio climático del IPCC

## 1.2. Zonas agroclimáticas

Las áreas que registran condiciones óptimas para el cultivo del cacao y se agrupan según el comportamiento del clima se conocen como ZAC, estas son estimadas a partir de la agrupación clúster con Random Forest. Estas ZAC son áreas en las cuales hay idoneidad climática para el desarrollo del cultivo del cacao. Dentro del rango climático de idoneidad para el cacao existen diferentes zonas agroclimáticas así tenemos que hay unas zonas que tienen mayor temperatura que otras, y zonas con mayor precipitación que otras. De acuerdo con esto, en las zonas húmedas – cálidas, por ejemplo, se podría cultivar cacao bajo las características de lluvia y temperaturas más altas respecto a otras zonas idóneas. Además de estas ZAC hay zonas con limitaciones y aptitud incierta, que son áreas en las que se tiene idoneidad para el cultivo, pero con poca certidumbre, es decir, que podría no ser climáticamente viable cultivar allí.

Con estas ZAC se podría apoyar a los actores cacaoteros en el desarrollo de una planeación prospectiva estratégica, con miras a tener la seguridad alimentaria del cacao a largo plazo. Para identificar las zonas idóneas se tomó como referencia la línea de escenario climático intermedio llamado RCP 6.0 para los periodos 2040 – 2060 (2050s en adelante) y 2060 – 2080 (2070s en adelante), con esto se tendrías dos miradas, tanto a mediano como largo plazo sobre dónde posiblemente cultivar cacao según estas proyecciones climáticas, paralelamente se estiman las zonas de gradiente de impacto, estas indican las diferencias en idoneidad identificadas con las ZAC.

## 1.3. Zonas de gradiente de impacto

Las zonas de gradiente de impacto representan la diferencia en la idoneidad para el cultivo, en este caso del cacao, entre la línea base y cada temporalidad futura. Para esto existen cuatro categorías:

**Oportunidades:** zonas en las cuales bajo la línea base no se tiene idoneidad para el cultivo pero que, debido al cambio del clima, a futuro sí sería altamente idóneo cultivar allí.

**Adaptación sistémica / Resiliencia sistémica:** estas áreas a futuro permanecerían aptas, pero con un estrés considerable que hará necesaria una adaptación integral del sistema productivo. Se deben priorizar prácticas, tan pronto como sea posible, con alto potencial de mitigación y adaptación y combinarlas con un cambio sistémico.

**Adaptación incremental:** estas áreas tienen probabilidad de permanecer aptas de cara al futuro, bajo la premisa que se deben generar buenas prácticas agrícolas basadas en la intensificación sostenible de la producción y la adaptación incremental, mediante la ampliación de la cartera de los productos de los agricultores para gestionar el riesgo climático.

**Transformación:** el aumento del estrés climático hace que la adaptación o un cambio de estrategia sean indispensables. Sin una adaptación integral, la producción del cacao no sería muy viable. Se deberían entonces priorizar prácticas con alto potencial de mitigación y adaptación, de la mano de un cambio sistémico.

## 2. Datos y metodología

### 2.1. Método / Metodología

Con el fin de identificar las ZAC para el cultivo de cacao en distintos horizontes de tiempo, tanto línea base como dos períodos futuros, se utilizó el método Random Forest (RF, en Adelante), que es un clasificador de aprendizaje automático formado por conjuntos de árboles de clasificación y se caracteriza por su eficacia en grandes conjuntos de datos.

RF se utilizó para clasificar el clima de las zonas donde se ubica el cacao para examinar la distribución espacial de cada una de las ZAC definidas para evaluar el clima de las regiones productoras de cacao en la región objeto de estudio. A su vez se extrapoló RF desde un enfoque probabilístico y como resultado se obtuvo una capa espacial que representa la probabilidad de éxito del cacao, esto para los distintos horizontes de tiempo: (1) línea base; (2) 2040 – 2060; y (3) 2060 - 2080. En la Figura 2 se ilustra el flujograma con los pasos realizados en el presente documento.

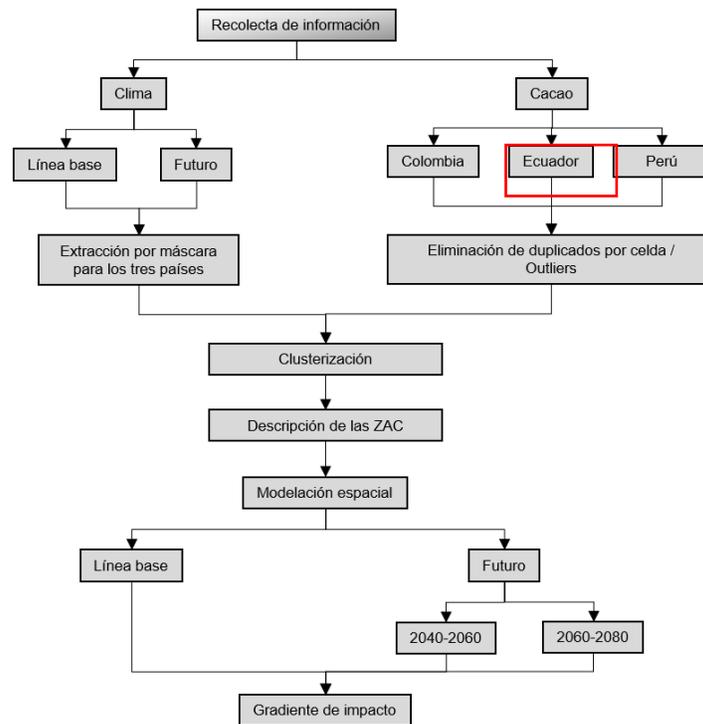


Figura 2. Flujograma de trabajo. Recuadro en rojo ilustra que en este caso se hizo para Ecuador.

A continuación, se lista brevemente la descripción de los pasos presentados en el flujograma.

- Descarga y procesamiento (recorte para la zona de estudio) de información climática de CHELSA, tanto para la línea base, como para los dos horizontes futuros.
- Recolecta y limpieza de información de presencias de cacao en la zona objeto de estudio, aquí se eliminaron presencias cercanas entre sí en un radio de 5 km, así como también se suprimieron los posibles datos atípicos.
- Agrupación (clústers) de las presencias del cultivo de cacao en función de las variables climáticas en las que se generan las ZAC.

- Caracterización del comportamiento de las variables climáticas para cada ZAC.
- Estimación de zonas de limitaciones y con aptitud incierta que fueron identificadas así:
  - o *Zonas con limitaciones*, son aquellas zonas en las que el análisis clúster identifica el resultado como no idóneo pero el resultado probabilístico indica que sí es idóneo, es decir que los dos resultados no concuerdan, lo que genera limitantes.
- *Zonas con aptitud incierta*, son las zonas en las que se podría cultivar cacao pero con altos niveles de incertidumbre.
- Extrapolación espacial del comportamiento de las ZAC en la zona objeto de estudio para la línea base y las proyecciones hacia los dos horizontes futuros.
- Cálculo del gradiente de impacto, que permite ver las diferencias en la idoneidad entre los distintos periodos de tiempo.

## 2.2. Datos climáticos y de presencias de cacao

El método RF utilizado para el presente análisis requiere básicamente tres fuentes de datos: (1) información climática espacializada en formato raster; (2) presencias del cultivo de cacao; (3) pseudoausencias que son los lugares donde no se tiene conocimiento de la presencia o ausencia del cultivo de cacao.

- (1) Se utilizó información climática proveniente de los datos de CHELSA (Karger et al 2019), que son 19 variables bioclimáticas que caracterizan el comportamiento de la precipitación y la temperatura para el periodo de 1970 – 2007. Estos datos vienen en formato raster a una resolución de 30 arcos de segundo en aproximadamente 1 km<sup>2</sup>.

A continuación, se lista el significado de cada variable bioclimática:

- |   |   |
|---|---|
| - Bio 1: temperatura promedio anual (C)                     | - Bio 12: precipitación anual (mm)                    |
| - Bio 2: rango promedio diario (C)                          | - Bio 13: precipitación del mes más húmedo (mm)       |
| - Bio 3: Isotermalidad (-)                                  | - Bio 14: precipitación del mes más seco (mm)         |
| - Bio 4: estacionalidad de la temperatura                   | - Bio 15: estacionalidad de la precipitación (-)      |
| - Bio 5: temperatura máxima del mes más cálido              | - Bio 16: precipitación del trimestre más húmedo (mm) |
| - Bio 6: temperatura mínima del mes más frío (C)            | - Bio 17: precipitación del trimestre más seco (mm)   |
| - Bio 7: rango de temperatura anual                         | - Bio 18: precipitación del trimestre más cálido (mm) |
| - Bio 8: temperatura promedio del trimestre más húmedo (C)  | - Bio 19: precipitación del trimestre más frío (mm)   |
| - Bio 9: temperatura promedio del trimestre más seco (C)    |   |
| - Bio 10: temperatura promedio del trimestre más cálido (C) |   |
| - Bio 11: temperatura promedio del trimestre más frío (C)   |   |

También se usó un escenario climático intermedio llamado RCP 6.0 que está conformado por un total de 17 GCM (Modelos de Circulación General), cada uno de ellos da una mirada distinta de lo que sería el comportamiento del clima de cara al futuro y tiene unas proyecciones climáticas similares a las de los demás RCP (*Representative Concentration Pathways*) al periodo 2050. Esas proyecciones climáticas se componen

de 4 RCP, los cuales son RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 watts/m<sup>2</sup> los que abordan tres temáticas: *climate system, impacts and adaptation* y *mitigation of mision*. Cada RCP tiene distintas proyecciones del comportamiento de la temperatura y la precipitación. El RCP 2.6 es el más ambientalista y optimista, puesto que estima menor emisión de gases de efecto invernadero, mientras que el RCP 8.5 es el que representa los cambios más extremos, con mayor aumento de temperatura y mayor variabilidad para la precipitación. En este estudio se hace uso del RCP 6.0 que da una mirada intermedia de todos los RCP.

(2) Presencias del cultivo de cacao, este dato es referente a donde se ubica el cacao en las regiones productoras del cultivo.

Las presencias de cacao que se ilustran en la Figura 3 provienen de distintos actores y productores del cultivo, así como también del uso de información de entidades oficiales; tal es el caso del uso de las coberturas del proyecto “Mapa de cobertura y uso de la tierra en Ecuador continental”.

Las presencias del cacao y el clima sirven para conocer el comportamiento del cacao para las variables de temperatura y precipitación y sirve como muestra para que el modelo distinga las características climáticas del cultivo de cacao y haga la extrapolación a las zonas en las cuales no se tiene el conocimiento de la presencia del cultivo de cacao, es decir, a las pseudoausencias.

(3) Pseudoausencias, son lugares distintos a donde se tiene conocimiento de la presencia del cultivo de cacao y se utilizan para tener una muestra del comportamiento del clima en lugares distintos a donde éste se cultiva.

En la Figura 3 se ilustran tanto las presencias de cacao, como las pseudoausencias para la modelación del cultivo.

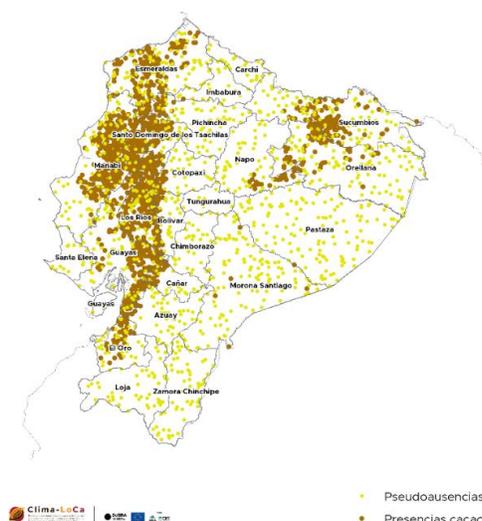


Figura 3. Presencias y pseudoausencias del cultivo de cacao en Ecuador.

Al inicio eran un poco más de 1,000 presencias ubicadas en distintas zonas cacaoteras del país, sin embargo, después de hacer el filtro de cercanía de 5 km estas quedaron reducidas a un poco más de 800 presencias en el territorio ecuatoriano; este mismo número de puntos se generó para las pseudoausencias, estas presencias y pseudo-ausencias se pueden ver en la Figura 3.

### 3. Resultados

La sección de resultados se divide en cinco categorías: cambio climático en la región, comportamiento de las ZAC, probabilidad de idoneidad del cultivo, gradiente de impacto, e incertidumbre de los distintos modelos de cambio climático.

#### 3.1. Cambio climático en la región

El cambio climático consiste en cambios o alteraciones en las condiciones predominantes de variables meteorológicas como precipitación y temperatura principalmente, dados en periodos de 30 años o más, según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Uno de los sectores más sensibles al cambio climático es la agricultura, debido a que depende directamente de factores como la temperatura y la precipitación, por lo que cualquier cambio en ellos puede generar impactos significativos sobre la producción agrícola y los procesos relacionados con ésta.

Los mayores cambios de temperatura se darán al oriente del país, en cercanías a la selva amazónica, donde aumentaría hasta 2.0°C, mientras que sobre el occidente del país en cercanías al océano pacífico habría cambios alrededor de los 1.6°C. Con relación a los cambios en precipitación se tiene que la región en cercanías al océano pacífico presentará los mayores aumentos con hasta un 14.5% más de la precipitación que se ha registrado históricamente, mientras que la zona oriental del país, en cercanías a la selva amazónica, se presentaría un leve aumento de alrededor 2%. Figura 4.

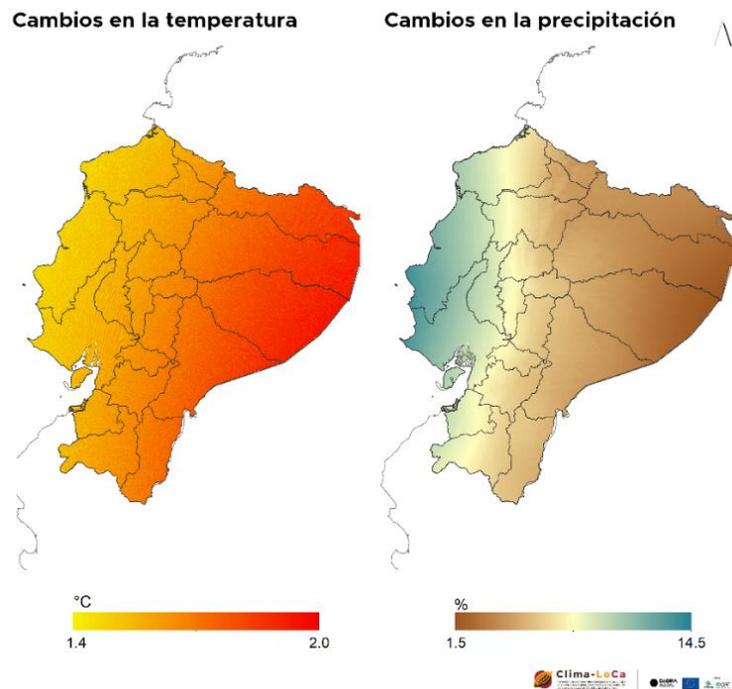


Figura 4. Cambios en la temperatura y la precipitación entre la línea base y el periodo 2070s - RCP 6.0 Promedio de modelos.

Los mapas presentados en la Figura 4 ilustran el comportamiento promedio de todos los GCM (Modelos de Circulación Generalizado) que componen el RCP 6.0, cada uno de estos GCM tiene una mirada distinta del clima hacia futuro.

El comportamiento de las distintas miradas de cambio climático de cada GCM de este RCP 6.0 se observan en la Figura 5.

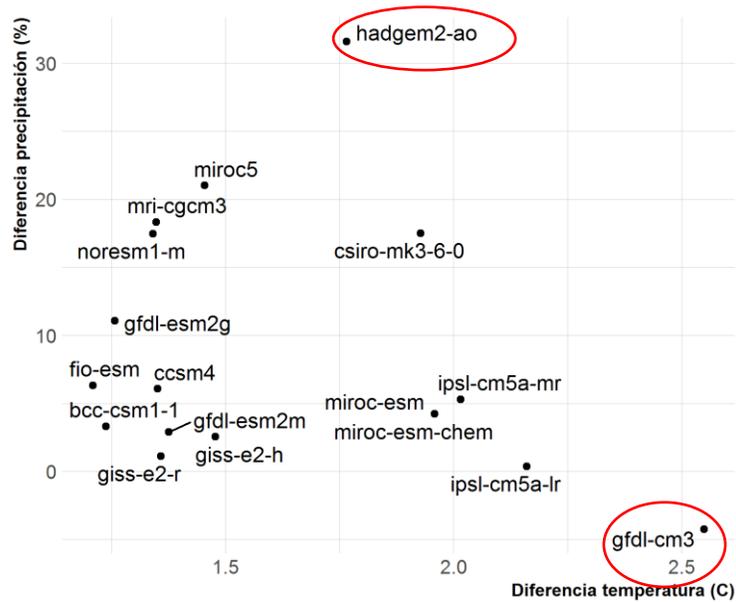
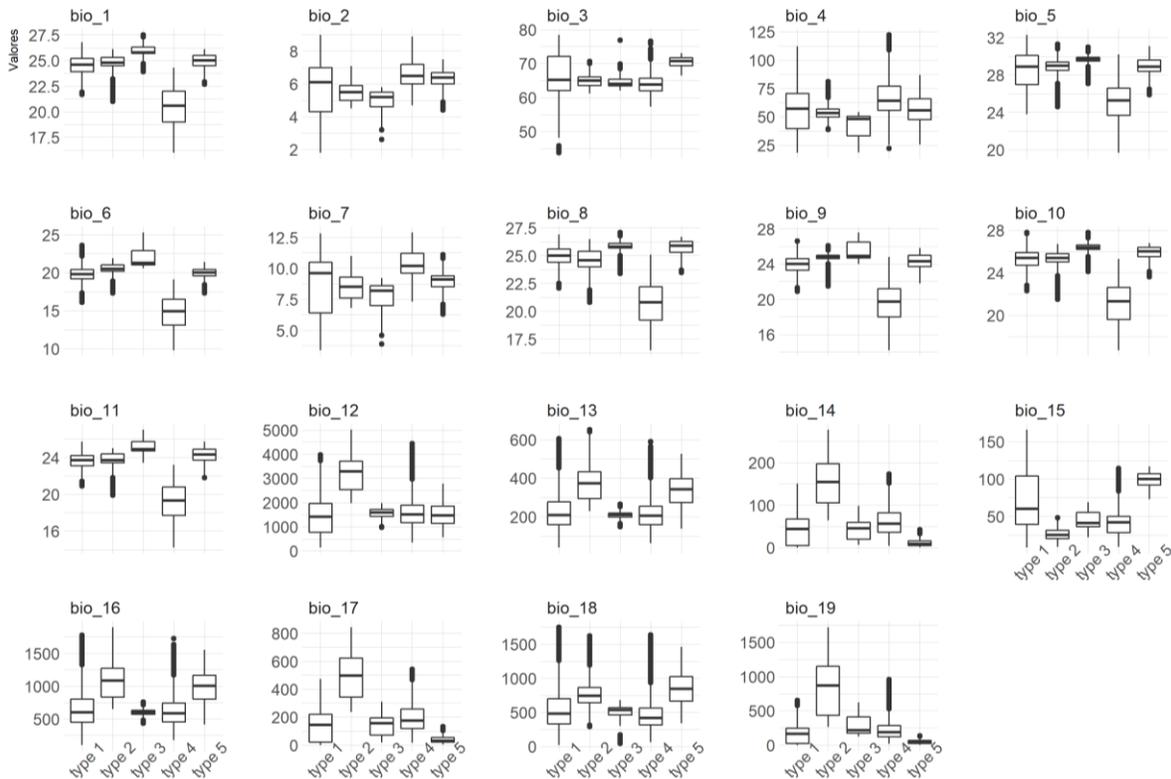


Figura 5. Diferencias para las variables de temperatura y precipitación

La temperatura presentaría en los distintos modelos un aumento que iría desde 1.2°C hasta los 2.5°C, mientras que para la precipitación hay escenarios que muestran una reducción, mientras que otros presentan un aumento de hasta el 30%. El modelo gfdl-cm3 presenta una reducción de alrededor 2% en la precipitación y un aumento de más de 2.5°C; de otro lado el modelo hadgem2-ao es el de mayor aumento de precipitación presenta, con un poco más del 30%, y un aumento alrededor de 1.75°C. El modelo hadgem2-ao se denomina como Muy húmedo – Cálido, y el modelo gfdl-cm3 se denominaría Constante – Muy cálido.

### 3.2. Comportamiento de las ZAC

En la siguiente figura se ilustra el comportamiento de los cinco distintos clústeres - ZAC para las presencias de cacao. De las cuales se encuentran 4 en Ecuador, estas zonas se denominan templado – seco, cálido – húmedo, frío – seco, y cálido – seco.



ZAC

Figura 6. Zonas agroclimáticas para el cultivo del cacao en Ecuador.

El comportamiento de los clústeres en las variables de precipitación para el **clúster 1** (*type 1*) tienden a tener valores bajos, como es el caso de la precipitación anual acumulada, la precipitación del mes más húmedo y seco, estas dos últimas tienen valores por debajo de los 300 mm en su valor de mediana, por otra parte la variable de la precipitación del trimestre más frío tiene valores por debajo de 250 mm en su valor de mediana, mientras que las variables de precipitación del trimestre más seco tienen valores alrededor de los 200 mm, siendo uno de los grupos más bajos respecto a los demás; en relación a la temperatura este clúster presenta valores de temperatura promedio anual muy cerca a la media respecto a los demás clústeres teniendo así valores alrededor de los 24°C, este mismo fenómeno sucede con variables como la temperatura promedio del trimestre más húmedo, del trimestre más seco y más cálido, es decir, tiene valores promedio en relación a los demás clústeres; con lo cual, este clúster tiene características climáticas **Templado – Seco**. Figura 6.

El **clúster 2** (*type 2*) tiene valores de precipitación acumulada anual altos, un poco por encima de los 3,000 mm, en su valor de mediana, siendo el más húmedo respecto a los demás, ahora bien, para la precipitación del trimestre más húmedo se tienen valores cercanos a los 1,200 mm, mientras que para la precipitación del trimestre más seco los valores sobrepasan los 400 mm; en adición se tienen los valores más altos para la precipitación del trimestre más frío, registrando valores alrededor de los 900 mm. Para la temperatura promedio anual este clúster cuenta con la segunda temperatura más alta, al estar el valor un poco cercano a los 25°C, mientras que la temperatura del mes más frío se registra un valor por debajo de los 22°C, estos valores de temperatura se encuentran, en general, por encima de otros dos clústeres. Por todo lo anterior este clúster es clasificado como **Cálido – Muy húmedo**. Figura 6.

Con relación al **clúster 3** (*type 3*) la precipitación registra valores acumulados anuales cercanos a los 1,250 mm en su valor de mediana, siendo el promedio respecto a los demás clústers, en relación a las variables de precipitación del trimestre más frío tiene valores cercanos a los 250 mm, mientras que la precipitación del trimestre más húmedo y más cálido tienen valores cercanos a los 500 mm. En relación a las variables de temperatura, en general, presenta los valores son los más altos respecto a los demás clústeres, como es el caso de la temperatura promedio anual, la temperatura del trimestre más húmedo, más seco y más; por todo esto, este clúster se denomina como **Muy Cálido – Seco**. Para el caso de este país de Ecuador no hay presencia de zonas bajo este tipo de clima. Figura 6.

El **clúster 4** (*type 4*) presenta los valores más bajos respecto a los demás clústeres, su promedio está alrededor de los 21°C, el mismo fenómeno sucede con variables como la temperatura promedio del trimestre más húmedo, temperatura promedio del trimestre más seco, más cálido y más frío. De otro lado, los valores de la precipitación acumulada anual son cercana a los 1,500 mm, de los más bajos respecto a los demás clústeres, de otro lado, la precipitación del trimestre más cálido tiene los valores más bajos de los cinco clústeres, teniendo su valor de mediana por debajo de los 500 mm, mientras que la precipitación del trimestre más húmedo también es el más bajo en su mediana, valor cercano a los 520 mm. Con lo cual, este clúster se caracteriza bajo la denominación de **Frío – Seco**. Figura 6.

El **clúster 5** (*tipo 5*) presenta los valores más bajos de precipitación para las variables de precipitación del trimestre más cálido, precipitación del trimestre más húmedo, y los segundos valores más bajos para la precipitación acumulada anual, y la precipitación del trimestre más frío. Mientras se tienen los datos de temperatura promedio anual altos, con su mediana por encima de los 25°C, para el caso de la variable de temperatura promedio del trimestre más húmedo se tienen los valores más altos en su mediana, por encima de los 26°C, y la segunda temperatura más alta para la variable de temperatura promedio del trimestre más húmedo, con valores por encima de los 24°C, con lo cual este clúster se denomina **Cálido – Seco**. Figura 6.

En resumen, a continuación, se listan los cuatro tipos de zonas agroclimáticas presentes en Ecuador:

- Templado – Seco
- Cálido – Muy húmedo
- Frío – Seco
- Cálido – Seco

Los resultados de las ZAC bajo los tres períodos de tiempo se ilustran en la figura 7.

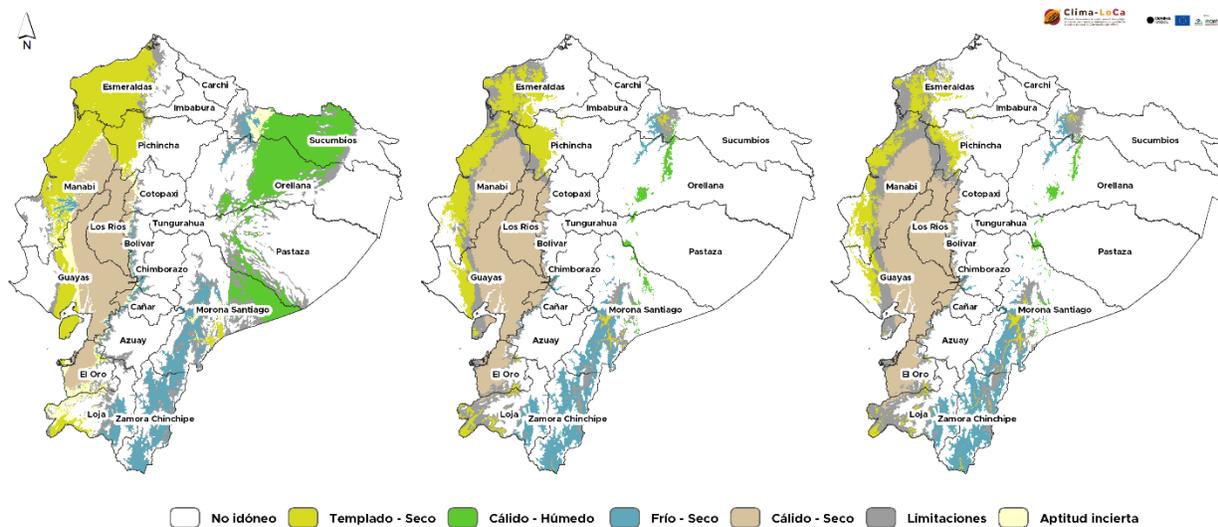


Figura 7. Zonas agroclimáticas para los distintos periodos de tiempo (izq) Línea base (cen) 2040 - 2060 (der) 2060 - 2080.

Como se visualiza en la Figura 7 (izq.) para el periodo base se tienen grandes zonas agroclimáticas, ubicadas principalmente al oeste y este del país; los departamentos que menos predominan las zonas templado – seco, cálido – seco y cálido – húmedo, las zonas con menor idoneidad son Imbabura, Carchi, Chimborazo, Bolívar, Cañar y Azuay. También se resalta una gran zona de idoneidad en la región entre Sucumbios y Orellana, región altamente cultivadora de cacao.

Hacia el horizonte futuro del 2050s, ver Figura 6 (der.); las ZAC al oeste del país se mantienen, sin embargo, las zonas idóneas en el este perderían idoneidad en este horizonte de tiempo.

Para el periodo de 2050s (Figura 7 Cen) se tienen menos zonas agroclimáticas que se mantienen constantes al oeste del país, en departamentos como Manabi, Esmeraldas Guayas y los Rios, caso contrario se evidencia ausencia de idoneidad en la región altamente cacaotera de Sucumbios en este horizonte de tiempo, aquí se registra ausencia de la ZAC de Cálido - Húmedo. Fenómeno similar sucede con el periodo de 2070s (Figura 7 der), aquí ocurre la eliminación de las zonas cálido – húmedo en la región de Sucumbios y Orellana, sumado a reducción aún mayor de las zonas idóneas en Morona – Santiago.

De otro lado, el comportamiento del clima para las distintas ZAC en los puntos donde hay presencia de cacao se puede observar en la figura 8 en un climatograma.

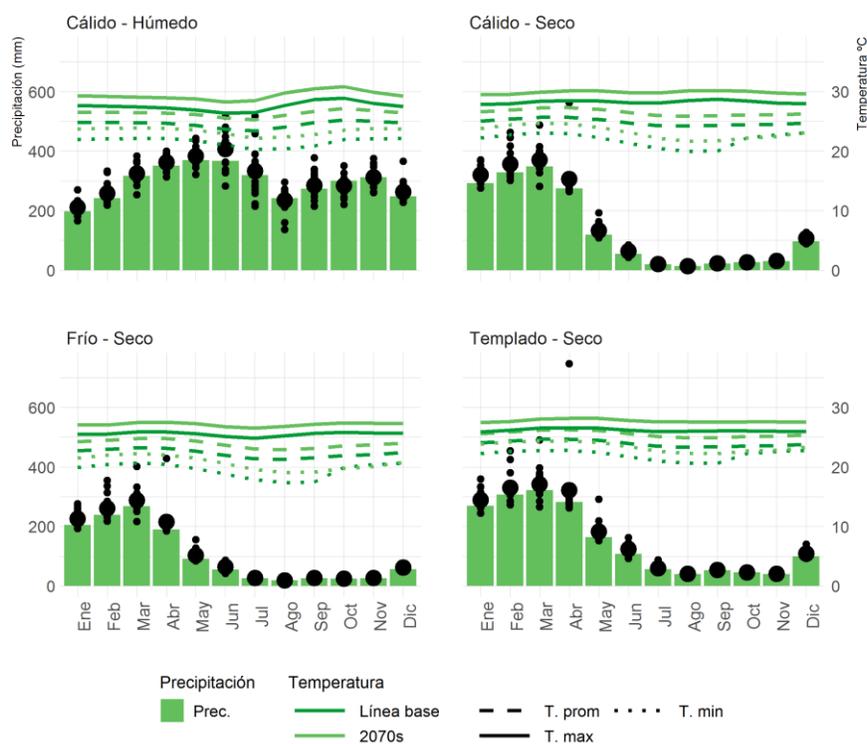


Figura 8. Climatograma para los distintos puntos de presencia de cacao por ZAC

En la anterior figura las barras representan la precipitación y los puntos indican las distintas proyecciones de los GCM, donde el punto más grande es el que indica el valor de la mediana de los datos climáticos futuros. Las líneas indican las temperaturas media, mínima y máxima y los colores diferencian los dos periodos de tiempo. Se presenta un aumento de hasta 1°C para las zonas donde se cultiva cacao, y una mayor precipitación para el clúster “Cálido – Húmedo”, respecto a los otros dos clústers, puesto que para los meses más húmedos se tienen valores por encima de los 300 mm. De otro lado, la ZAC cálido – húmeda es la única que presenta precipitación por encima de los 200 mm para el segundo semestre del año.

### 3.3. Probabilidad de idoneidad

Los resultados probabilísticos idóneos muestran las zonas con mayor o menor idoneidad, las cuales van de 0 a 1, donde 0 significa nula idoneidad y 1 idoneidad muy alta. Esto permite ver quizá otras zonas que no salen en las ZAC pero que podrían ser igual de idóneas para el cultivo del cacao. En la figura 9 se ilustran los mapas para los tres distintos períodos de tiempo.

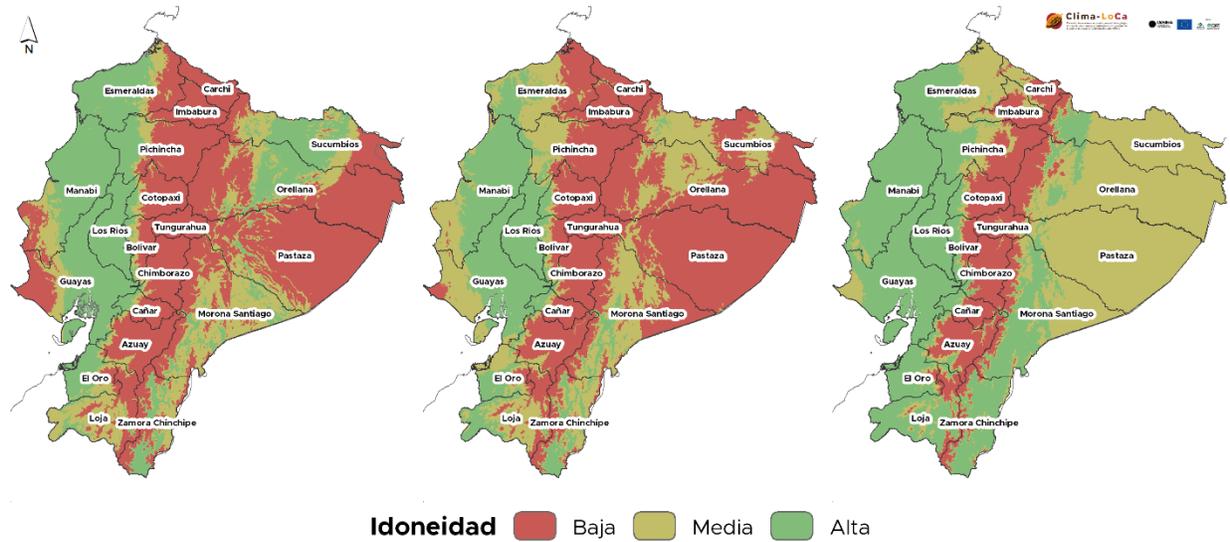


Figura 9. Idoneidad probabilística del cultivo de cacao en Ecuador bajo los tres distintos periodos de tiempo. (Izq) Línea base (Cen) 2050s (Der) 2070s.

La capa de idoneidad probabilística tiene valores de 0 a 1, los rangos de bajo media y alto fueron ajustados de 0 a 0.5, zonas de idoneidad baja; de 0.5 al tercer cuartil es idoneidad media, valores por encima del tercer cuartil son denominados bajo la categoría alta. Se observa que las zonas idóneas se localizan principalmente al occidente del país, en departamentos como Manabí, Los ríos y Guayas, mientras que la zona con menor idoneidad se localiza en el centro (sur a norte del país). Un fenómeno interesante es que a futuro la zona oriental del país ganará idoneidad para el cultivo (Figura 9. Der).

### 3.4. Gradiente de impacto

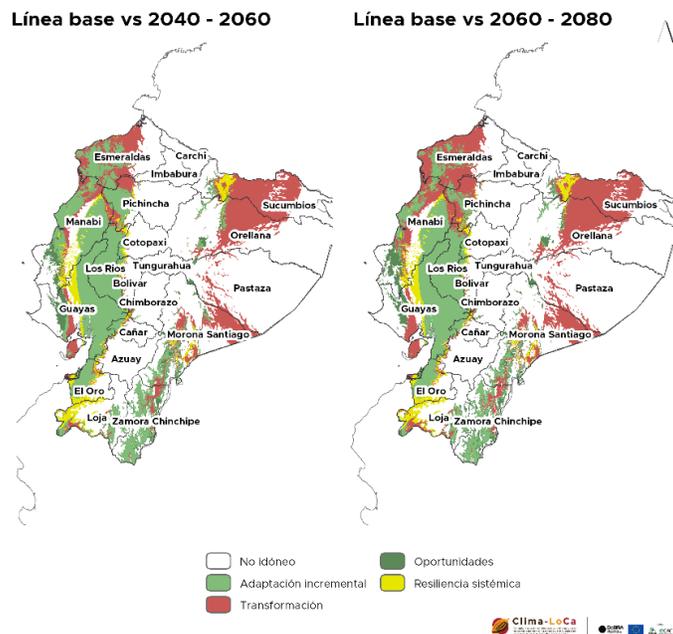


Figura 10. Zonas de gradiente de impacto para el cacao.

Las diferencias en idoneidad existentes entre la línea base y los dos periodos futuros, figura 10, se analizan a continuación.

Las principales zonas de transformación para ambos periodos de tiempo, se localizan principalmente en el nororiente del país, en los departamentos de Sucumbíos y Orellana, y al noroccidente del país en zonas como Esmeraldas y Pichincha. El área de transformación para el periodo 2050s es de más de 3.7 millones de ha, y para el 2070s se tiene un área de 4.4 millones de ha.

En el caso de las áreas de resiliencia sistémica se tienen 950 mil ha para el 2050s. Los departamentos con mayor área son Guayas, Sucumbíos, El Oro y Loja; por otro lado, para el 2070s se tiene un total de 940 mil ha, en los que los departamentos con mayor área son igualmente Sucumbíos, Guayas, El Oro y Loja.

Luego se encuentran las zonas de adaptación incremental que para el año 2050s se calculan en total 4.7 millones de ha ubicadas principalmente en departamentos como Guayas, Los Ríos, Manabí, y Zamora; para el 2070s el registro indica que se tienen 3.9 millones de ha, teniendo así una reducción de 800 mil ha respecto al periodo 2050s, ahora bien, en los departamentos donde se mantienen principalmente estas zonas son Los Rios, Manabí, Guayas y Zamora.

En el caso de las zonas de oportunidades se tienen pocas áreas que se ubican en zonas similares para ambos periodos de tiempo. Así tenemos que para el 2050s se tienen en total 709 mil ha, y los departamentos con mayor área Morana, Chinchipe, Guayas y Manabí. Para el periodo 2070s hay un leve aumento de áreas de oportunidades con un poco más de 800 mil ha, ubicadas principalmente en los mismos departamentos mencionados anteriormente.

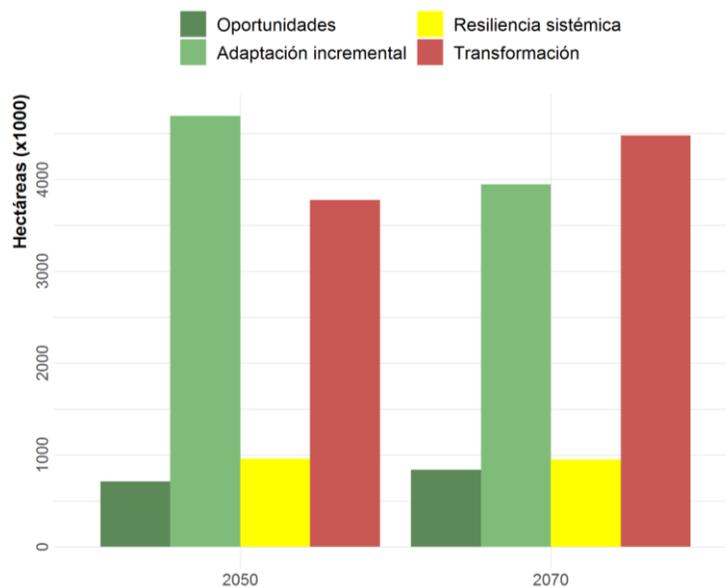


Figura 11. Áreas de gradiente de impacto para la línea base vs 2050s y línea base vs 2070s.

Las diferencias en idoneidad existentes entre la línea base y los dos periodos futuros, se describen a continuación.

A nivel general hay mayor cantidad de área de transformación respecto a las demás categorías, mientras que las áreas de menor área son las de oportunidades. Además, se ve un aumento en las áreas de

transformación y una reducción en las áreas de adaptación incremental. Las áreas de resiliencia sistémica se mantienen casi que constantes entre ambos periodos de tiempo, figura 11.

### 3.5. Incertidumbre de modelos de cambio climático

El RCP 6.0 para los datos de CHELSA están conformados por un total de 17 GCM (Modelos de Circulación Generalizados) que tienen distintas proyecciones del comportamiento del clima hacia el futuro, para el caso de la temperatura todos los modelos coinciden en que habrá aumento en la temperatura, mientras que para la precipitación algunos modelos indican que habrá aumento de precipitación y otros modelos indican que habría una disminución en esta variable, este fenómeno sucede con los valores de estas variables para la muestra de las presencias del cultivo del cacao del país. En la siguiente figura se ilustran los dos GCM extremos tanto de precipitación como de temperatura.

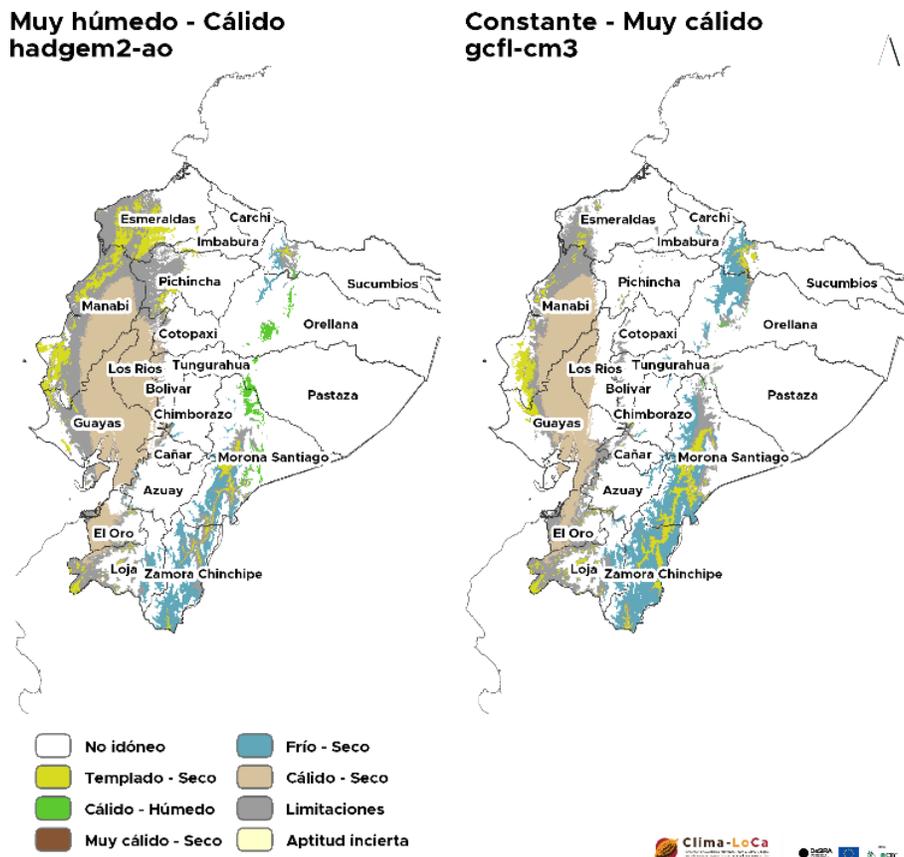


Figura 12. ZAC para los GCMs climáticos extremos en el periodo 2070s.

Como se puede observar en la anterior figura la principal diferencia entre los distintos modelos es la mayor presencia de zonas “Frías – Secas” en el modelo gdfi-cm3, estos ubicados principalmente al sur del país, y en el norte del país propiamente en departamentos como Orellana y Sucumbios. De otro lado en el GCM hadgem2-ao hay mayor presencia de zonas “Templadas – Secas”, propiamente en el departamento de Esmeraldas y norte de Manabí.

## 4. Discusión

### 4.1. Área idónea versus área cultivada

En promedio se cultiva en Ecuador 43 mil ha de cacao, que se distribuyen en 20 de los 24 departamentos del país, siendo Chimborazo el de menor área cosechada con solo 6 ha, y el departamento de Manabí el que presenta mayor área con un poco más de 21 mil ha cosechadas para el 2019.

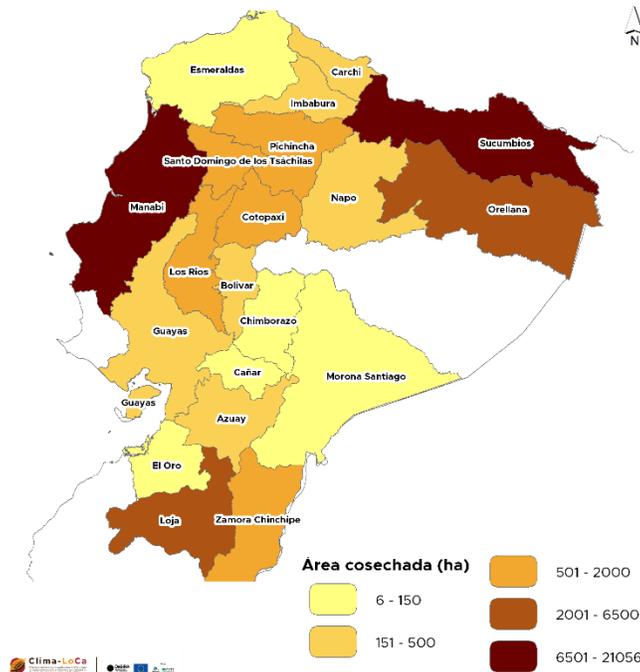


Figura 13. Área cosechada de cacao. Adaptado del Ministerio de Agricultura y Ganadería (2019).

El área total cosechada es de 43,921 ha y el área total de zonas de adaptación incremental y oportunidades suman juntas para el periodo 2050s más de 5 millones de ha; mientras que para el año 2070s se tiene que estas dos categorías de gradiente de impacto suman 4.7 millones de ha, en ambos casos se da que el área disponible para cultivar a futuro sumar mucho más que el área total cosechada en promedio actualmente.

Sucumbios es uno de los departamentos con mayor área cosechada de cacao (aprox. 8,000 ha) presenta principalmente zonas de transformación, y unas pocas áreas de adaptación incremental localizadas al extremo occidental del departamento; de otro lado, Manabí es el departamento con mayor área cosechada, un poco más de 20,000 ha, y presenta zonas de gradiente de impacto de adaptación incremental, y transformación, y en menor medida de oportunidades, lo que sugeriría que esta zona a futuro podrá seguir cultivando el cacao sin verse mayormente afectado por el cambio climático, en la tercer posición con mayor área cosechada de cacao esta Loja, con un poco de más de 5,000 ha, parcialmente esta zona se vería afectada por el cambio climático, entre tanto hay presencia de zonas de transformación y resiliencia sistémica, y en menor medida hay zonas al este del departamento bajo la categoría de adaptación incremental.

## 4.2. Comparación entre distintos modelos

A continuación, se presenta la comparación entre los resultados del documento regional realizado para Colombia – Ecuador y Perú, así como también el análisis de cacao global realizado por Christian Bunn, para tener una mirada desde otras perspectivas de las zonas idóneas para el cultivo de cacao y el impacto del cambio climático sobre el mismo. Estos modelos tienen el mismo objetivo que es identificar la posible amenaza climática sobre el cultivo del cacao.

El modelo regional para la línea base indica que las zonas idóneas se localizarán principalmente al oeste y este del país, dejando un corredor central sin idoneidad, esto bajo la línea base, mientras que para el modelo global se presenta idoneidad en casi todo el país de Ecuador, dejando solo algunas zonas en el centro y oeste del país bajo las categorías de limitaciones y de aptitud incierta. Ahora bien, de cara al futuro en el modelo regional, se tiene mayor idoneidad en el oeste del país, propiamente en la costa pacífica, así como también en el sur del país algunas zonas bajo la categoría frío seco; paralelamente en el modelo global se tiene mayor presencia de zonas con limitaciones y de aptitud incierta al oeste, centro y oeste del país; no obstante, se denota una menor pérdida de idoneidad respecto al modelo regional.

En la Figura 14 se ilustran el comportamiento de los distintos modelos tanto para línea base (fila 1) como para el período 2070s (fila 2).

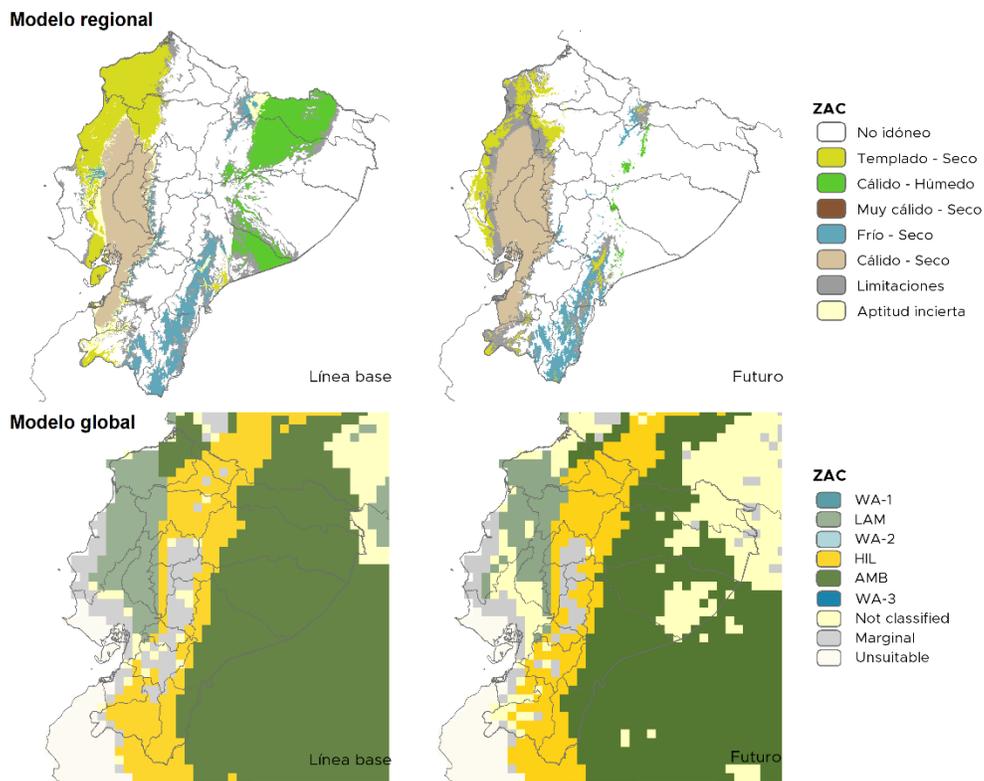


Figura 14. Comparación de modelos de idoneidad para el cacao bajo la línea base (fila superior) y el clima futuro (fila inferior).

## 4.3. Idoneidad del cultivo de cacao versus altitud

Producto de la extracción de los valores de la idoneidad y la altitud para los puntos de presencia del cacao, se tiene la siguiente figura.

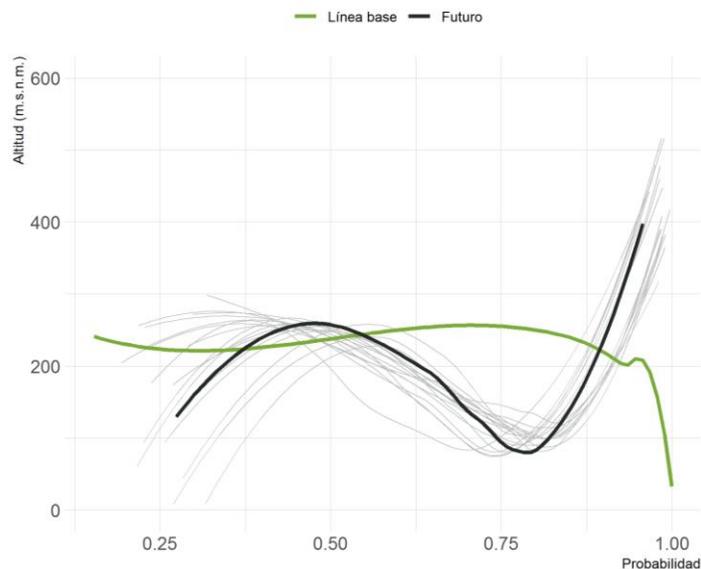


Figura 15. Idoneidad versus altitud; líneas en color gris son los distintos GCM.

Como se puede observar en la anterior Figura para el clima base se tiene que a mayor altitud hay una mayor idoneidad, esto hasta aproximadamente los 100 m.s.n.m., donde se tiene una idoneidad mayor al valor del tercer cuartil; paralelamente, hacía el futuro se tiene un comportamiento algo distinto, donde a mayor altura se tiene una mayor idoneidad, esto dado a partir del valor del primer cuartil (0.25), y luego hay un aumento en la idoneidad cuando se reduce la altitud, después del 0.8 del valor probabilístico de idoneidad; de otro lado, las distintas líneas grises que se ven en la gráfica son los distintos GCM, casi que todos tienen la misma conclusión, a mayor altura mayor probabilidad de idoneidad, esto después de los 100 m.s.n.m.

De acuerdo con lo anterior, se tiene que desde los 120 m.s.n.m hasta los 200 m.s.n.m hay una baja idoneidad para el cultivo, por debajo de 0.5; mientras que desde los 200 hasta los 400 m.s.n.m hay una alta idoneidad del cultivo, con valores muy cercanos a 1; todo esto bajo la línea base. Paralelamente, la idoneidad de cara al futuro se daría en el rango de 220 a los 290 msnm, mientras que la idoneidad por debajo de los 200 m.s.n.m tendrían una idoneidad por encima de valores de 0.8 de probabilidad. Bajo este orden de ideas, se puede concluir que el cacao encontrará su nicho climático entre los 50 y 200 m.s.n.m, pues allí se darían más las condiciones climáticas para que el cacao se desarrolle.

## 5. Validación con expertos

Con el fin de validar con expertos en Ecuador los resultados de los análisis del presente documento y comprobar si los mapas de las zonas cacaoteras del país y los mapas con las proyecciones de la variabilidad climática en dichas zonas cacaoteras son comprendidos por ellos, se realizó un taller cuyas actividades estaban orientadas a generar discusiones entre los participantes. Con el taller también se buscaba entender mejor la percepción que tienen del clima actual y de los cambios que se han dado en las zonas cacaoteras y conocer mejor las preocupaciones que tienen los expertos en cuanto a los impactos del cambio climático en dichas zonas.

Los resultados del taller se detallan a continuación:

- Los expertos sugirieron que el modelo descrito en el presente documento concuerda con las zonas cacaoteras del país y que en general las zonas de producción de cacao están bien representadas en los mapas de producción de cacao desarrollados por el equipo.
- El tema de deforestación es importante para los expertos por lo que sugirieron que más adelante se tengan en cuenta y se resalten en los mapas.
- Los expertos demostraron entender la clasificación de las diferentes zonas agroclimáticas y afirmaron que los impactos potenciales y las regiones afectadas que les compartimos en los mapas parecen en su mayoría acorde a lo que ya están experimentando. Sin embargo, hay una zona de cacao en el sur de Esmeralda que parece tener un clima diferente al de la proyección.
- Los expertos manifestaron que les parece buenas las proyecciones del clima y manifestaron querer proyecciones ser más cercanas que el 2050.
- Identificamos que es importante explicar a los usuarios de los mapas de clima que entre mejores datos públicos haya, los modelos de cambio climático serán más acertados.
- Los expertos mostraron mucho interés en los modelos presentados porque les parece que pueden ser útiles a la hora de buscar nuevas alternativas para enfrentar al cambio climático. Les parece que la siguiente fase es la toma de decisiones para hacerle frente en temas como captura de carbono. Otros temas para priorizar son: expansión y deforestación.

## 6. Conclusiones

La metodología aplicada en el presente documento nos permitió distinguir las zonas de mayor y menor amenaza para el cacao en el ámbito climático, y además presentar una metodología sencilla replicable para otros cultivos en la región.

La región cercana al océano pacífico y al sur del país resultan ser las idóneas para el cultivo del cacao tanto en la línea base como de cara al futuro. Los departamentos más cacaoteros como Manabí y Loja resultarán seguir siendo altamente idóneos para el desarrollo del cultivo del cacao. La ZAC “frío – seco” es la que más se mantendrá a futuro, departamentos como Zamora, Chinchipe y Morona albergan estas zonas, lado contrario se registra en Sucumbios y Orellana pérdida de idoneidad en esta región que es altamente cacaotera, teniendo más de 18 mil has de cacao cultivadas actualmente, siendo hacia el futuro una zona con riesgo climático para el cultivo del cacao, teniendo así probablemente que pensar en cambio de uso del suelo para esta región, diversificación de cultivos.

Las proyecciones de cambio climático dejan ver una alta incertidumbre en la precipitación, entre tanto, se tienen tanto posibles aumentos como reducciones en esta variable, por un lado, hay GCM que indican aumentos de hasta un 30% en los valores de la precipitación, mientras que otros GCM indican reducciones en valores de precipitación. Paralelamente, para la temperatura sí hay un acuerdo de los distintos GCM, todos señalarían un aumento de esta variable de cara al futuro. Esto imprime cierta incertidumbre en los modelos de idoneidad presentados en este documento.

Las proyecciones de cambio climático hacia el futuro permiten señalar que habría suficientes zonas donde cultivar cacao, más del área actual cosechada, sin embargo, hay ciertas zonas idóneas en la actualidad donde se cultiva y ya no lo serían más hacia el futuro, en estas áreas se recomienda realizar diversificación de cultivos.

## 7. Bibliografía

- Aidan D. Farrell, Kevon Rhiney, Anton Eitzinger & Pathmanathan Umaharan (2018): Climate adaptation in a minor crop species: is the cocoa breeding network prepared for climate change? *Agroecology and Sustainable Food Systems*, DOI: 10.1080/21683565.2018.1448924b
- Bunn, C., Läderach, P., Quaye, A., Muilerman, S., Nojonen, M. R., & Lundy, M. (2019). Recommendation domains to scale out climate change adaptation in cocoa production in Ghana. *Climate Services*, 16, 100123.
- Bunn, C., Castro, F., Lundy, M., & Läderach, P. (2018). *Climate change and cocoa cultivation*. Burleigh Dodds Science Publishing.
- Camelia, S. (2018). Informe producto 3: presentación de análisis climático actual y futuro. Proyecto: Cadenas de valor inclusivas y sostenibles. Informe producto. Ecuador. Quito.
- Camelia, S. (2018). Informe producto 4: presentación del análisis de los impactos del cambio climático sobre los cultivos de café, cacao y quinua. Informe producto. Ecuador. Quito.
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, P., Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas. *Scientific Data*. 4 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25:1965-1978.
- IPCC (2007) IPCC fourth assessment report: climate change 2007 (AR4). IPCC, Geneva.
- MAE. (2014). Guía explicativa ¿cómo incorporar el Cambio Climático en la planificación local? En M. d. MAE. Quito.
- MAE & PNUD. (2016). Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático. En Ministerio de Ambiente del Ecuador – MAE, Tercera Comunicación Nacional del Cambio Climático del Ecuador. Quito.
- Neira, D. P. (2016). Energy sustainability of Ecuadorian cacao export and its contribution to climate change. A case study through product life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2560-2568.
- Ramirez-Villegas, J., Salazar, M., Jarvis, A., & Navarro-Racines, C. E. (2012). A way forward on adaptation to climate change in Colombian agriculture: perspectives towards 2050. *Climatic change*, 115(3), 611-628.



Implementado con



En colaboración con

