

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SEDE RODRIGO FACIO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

TESIS DE GRADO

***CAMBIOS EN DISTRIBUCIÓN POTENCIAL Y AMENAZA DE CUATRO CULTIVOS  
AGRÍCOLAS SEGÚN MODELACIÓN DE MÁXIMA ENTROPÍA PARA CUATRO  
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN COSTA RICA***

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en  
Ingeniería Agrícola

Alberto Francisco Coto Fonseca

Diciembre, 2016

**“CAMBIOS EN DISTRIBUCIÓN POTENCIAL Y AMENAZA DE CUATRO CULTIVOS AGRÍCOLAS SEGÚN MODELACIÓN DE MÁXIMA ENTROPÍA PARA CUATRO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN COSTA RICA”**

Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.

---

Alberto Francisco Coto Fonseca

Candidato

---

Carlos Rojas Alvarado, Ph.D

Director de tesis

---

Ricardo Radulovich, Ph.D

Lector

---

Sergio Molina Murillo, Ph.D

Lector

---

Ronald Aguilar Álvarez, Ing.

Miembro Tribunal Examinador

---

Geovanni Carmona Villalobos, Ing.

Miembro Tribunal Examinador

## **DEDICATORIA**

*A Dios por ser la luz en mi vida y por proveerme de fortaleza y paciencia durante el proceso de elaboración de esta investigación y permitirme culminar con esta etapa.*

*Y a mis padres, Álvaro y Thais por su apoyo incondicional durante toda mi vida y ser los pilares que me enseñaron que con esfuerzo y dedicación se pueden cumplir las metas propuestas.*

## AGRADECIMIENTOS

*A Carlos Rojas y Sergio Molina por su gran apoyo y guía durante la elaboración del presente estudio. Y por recordarme el camino por el cual quiero dirigir mi vida profesional.*

*Al Dr. Adam Rollins por haberme dado la oportunidad de realizar la charla de mi investigación en Lincoln Memorial University (LMU). Por sus aportes que ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo; por permitirme estar en LMU, lo cual no solo me ayudó a mejorar a nivel profesional sino también a formarme como una mejor persona.*

*Al Centro de Investigación del Café (CICAFFE) por proporcionar la información relacionada con la base de datos de las zonas de cultivo de café en Costa Rica.*

*Al Ing. Freddy Sancho por facilitar la información correspondiente a la base de datos de las zonas de cultivo de arroz en Costa Rica.*

*A la Universidad de Costa Rica y la Escuela de Ingeniería Agrícola por proporcionar la educación superior que me permitió formarme a nivel profesional.*

*A Don Ricardo Radulovich por las revisiones y recomendaciones sobre el presente estudio.*

*A Don Geovanni Carmona y Ronald Aguilar por sus valiosas observaciones sobre la presente investigación.*

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE CUADROS .....	vi
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
CAPÍTULO 1. CONTEXTO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS .....	6
Distribución potencial de tres cultivos agrícolas en Costa Rica bajo escenarios de cambio climático: implicaciones de manejo agroforestal y desarrollo socioeconómico .....	6
Modelado del potencial uso del suelo para la gestión de café ( <i>Coffea arabica</i> ) y el bosque en Costa Rica con base en escenarios de cambio climático.....	28
CAPÍTULO 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	42
BIBLIOGRAFÍA .....	45
ANEXOS .....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

*Distribución potencial de tres cultivos agrícolas en Costa Rica bajo escenarios de cambio climático: implicaciones de manejo agroforestal y desarrollo socioeconómico.*

Figura 1. Distribución actual de los tres cultivos estudiados en el presente proyecto.....	9
Figura 2. Áreas de ganancia o pérdida proyectadas al año 2070 con alta probabilidad bioclimática de cambio asociado para el cultivo del arroz en los cuatro escenarios de cambio climático estudiados: (a) Miroc 4.5, (b) Miroc 6.0, (c) Hadgem 4.5 y (d) Hadgem 6.0. ....	14
Figura 3. Áreas de ganancia o pérdida proyectadas al año 2070 con alta probabilidad bioclimática de cambio asociado para el cultivo de caña de azúcar en los cuatro escenarios de cambio climático estudiados: (a) Miroc 4.5, (b) Miroc 6.0, (c) Hadgem 4.5 y (d) Hadgem 6.0. ....	15
Figura 4. Áreas de ganancia o pérdida proyectadas al año 2070 con alta probabilidad bioclimática de cambio asociado para el cultivo de piña en los cuatro escenarios de cambio climático estudiados: (a) Miroc 4.5, (b) Miroc 6.0, (c) Hadgem 4.5 y (d) Hadgem 6.0. ....	16
Figura 5. Cambio neto de posibles áreas aptas para el cultivo de (a) arroz, (b) caña de azúcar y (c) piña para los escenarios futuros evaluados en este estudio.....	17
Figura 6. Probabilidad de presencia de arroz por cantón para (a) la condición actual y los cuatro escenarios evaluados: (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0.....	18
Figura 7. Probabilidad de presencia de caña de azúcar por cantón para (a) la condición actual y los cuatro escenarios evaluados: (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0.....	19
Figura 8. Probabilidad de presencia de piña por cantón para (a) la condición actual y los cuatro escenarios evaluados: (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0.....	20
Figura 9. Traslape de cultivo de arroz y cobertura boscosa del país para: (a) condición actual y (b) escenarios futuros de cambio climático evaluados en la presente investigación.....	21
Figura 10. Traslape de cultivo de caña de azúcar y cobertura boscosa del país para: (a) condición actual y (b) escenarios futuros de cambio climático evaluados en la presente investigación.....	22
Figura 11. Traslape de cultivo de piña y cobertura boscosa del país para: (a) condición actual y (b) escenarios futuros de cambio climático evaluados en la presente investigación.....	22

*Modelado del Potencial Uso del Suelo para la Gestión de Café (Coffea arabica) y el Bosque en Costa Rica Basado en Escenarios de Cambio Climático*

Figura 1. Distribución geográfica actual del cultivo de café en Costa Rica.....	31
Figura 2. Mapas de Costa Rica donde se muestra la ganancia y pérdida de áreas aptas para la producción de café de acuerdo a los escenarios para el 2070 evaluados en la presente investigación: a) Miroc 4.5, b) Miroc 6.0, c) Hadgem 4.5 y d) Hadgem 6.0.....	35
Figura 3. Mapas de Costa Rica donde se muestra la probabilidad de ocurrencia para la producción de café de acuerdo con a) escenario actual, b) Miroc 4.5, c) Miroc 6.0, d) Hadgem 4.5 y e) Hadgem 6.0. La división cantonal es presentada al igual que tres cantones de gran relevancia para la producción de café se etiquetan en la parte superior.....	36
Figura 4. Mapa de Costa Rica donde se muestra el traslape entre a) las áreas de producción de café y la cobertura de bosque actual y b) el porcentaje de traslape calculado para todos los cuatro escenarios de cambio climático evaluados.....	37

## **ÍNDICE DE CUADROS**

*Distribución potencial de tres cultivos agrícolas en Costa Rica bajo escenarios de cambio climático: implicaciones de manejo agroforestal y desarrollo socioeconómico.*

Cuadro 1. Variables bioclimáticas y de elevación utilizadas en la modelación de la distribución actual y futura de los cultivos de arroz, caña de azúcar y piña.....	12
Cuadro 2. Cantidad de pixeles correspondientes a la condición de presencia de los cultivos a nivel nacional para los cuatro escenarios de cambio climático evaluados en el presente estudio.....	13

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

**AUC:** Por sus siglas en inglés Área Bajo la Curva

**CCAFS:** Por sus siglas en inglés Programa de Investigación en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria

**CGIAR:** Por siglas en inglés Centro Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional

**CICAFE:** Centro de Investigación del Café

**CONARROZ:** Corporación Arrocera Nacional

**GEI:** Gases de Efecto Invernadero

**HADGEM2-ES:** Por sus siglas en inglés Modelo Global del Ambiente 2 Hadley – Sistema Terrestre

**IPCC:** Por sus siglas en inglés Grupo Intergubernamental de Expertos de Cambio Climático

**LAICA:** Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar

**MAG:** Ministerio de Agricultura y Ganadería

**MCG:** Modelo de Circulación General

**MIROC-ESM:** Por sus siglas en inglés Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima – Modelo del Sistema Terrestre

**PIB:** Producción Interna Bruta

**SETENA:** Secretaría Técnica Nacional Ambiental

**SIREFOR:** Sistema de Información de Recursos Forestales de Costa Rica

**RCP:** Por sus siglas en inglés Sendas Representativas de Concentración\*

**PSA:** Pago de Servicios Ambientales

**VAA:** Valor Agregado Agropecuario

\*Para mayor información acerca de las diferencias entre los cuatro RCP consultar el Quinto Informe del IPCC (AR5).



## RESUMEN

En el presente estudio se evaluaron las distribuciones actuales y potenciales futuras bajo un marco de cuatro escenarios de cambio climático para los cultivos agrícolas de arroz, café, caña de azúcar y piña en Costa Rica para el año 2070. Para ello se utilizaron una malla de puntos de ubicación geográfica de las zonas de cultivo a través de todo el país y variables bioclimáticas. Con ello se elaboraron modelos de distribución en MaxEnt (Máxima Entropía) de los distintos escenarios futuros para poder determinar los potenciales cambios en las zonas óptimas de cultivo, la probabilidad de presencia a nivel de cantón administrativo y los potenciales efectos sobre la cobertura boscosa actual.

Para café, las zonas de mayor altitud han resultado con una alta probabilidad de mantenerse como áreas óptimas. En el caso del arroz, las regiones Pacífico y Caribe han mostrado alta probabilidad de sostener dicho cultivo, aunque parte de la región Pacífico Central presentó reducción del área óptima. La caña de azúcar es el único cultivo que presentó una ganancia neta positiva a través de todos los escenarios de cambio climático, siendo Guanacaste una de las zonas donde se muestra un mayor potencial de expansión del área óptima. De forma contrastante, los escenarios evaluados para el cultivo de piña mostraron un cambio neto de área negativo en todos los escenarios futuros. Así, las áreas con la mayor probabilidad de efecto negativo para estos últimos tres cultivos corresponden a zonas rurales. En relación con el efecto de un posible traslape de zonas de cultivo con zonas de la cobertura boscosa del país en un futuro, la piña presentó los valores más bajos de traslape potencial. Las variaciones puntuales de la temperatura media anual y la precipitación anual no mostraron un patrón definido, por lo que no fueron importantes en el presente estudio.

Este tipo de estudios son necesarios debido a su importancia para promover la generación de información útil para el sector agrícola del país y para la toma de decisiones alrededor del concepto de mitigación del cambio climático. Al mismo tiempo, este tipo de trabajos de investigación alertan sobre las consecuencias socio-económicas potenciales en zonas vulnerables del país y favorecen la definición de políticas estatales a corto, mediano y largo plazo que permitan una producción sostenible y afín con las políticas de desarrollo local en Costa Rica.

## **CAPÍTULO 1. CONTEXTO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN**

El cambio climático es un tema actual de gran importancia en el mundo. Este fenómeno ejerce un efecto directo sobre aspectos que son de gran relevancia para el desarrollo, supervivencia del ser humano y de los demás seres vivos que habitan en el planeta. Uno de estos componentes clave del estilo de vida moderno es la actividad agrícola que provee alimentos y genera trabajo e ingresos económicos importantes en muchas sociedades.

Debido a que la actividad agrícola depende de las respuestas ecofisiológicas que las plantas ofrecen ante los estímulos climáticos externos, y que la dinámica de los ecosistemas naturales depende tanto del tiempo y el clima (1), la producción agrícola es altamente sensible ante el efecto de las variaciones climáticas. Un ejemplo de ello es el efecto de estos cambios sobre los rendimientos de los cultivos de arroz, maíz y trigo (2).

La idea anterior también es compartida por otras personas, ya que por posibles cambios que se presentarían en los próximos 30 o 40 años debido al calentamiento global, existe un ambiente de incertidumbre climática sobre el entorno agrícola del planeta. Lo anterior tiene un alto potencial de promover variaciones negativas en el componente socioeconómico y ecológico de aquellas regiones que se dedican a esta actividad (3).

Por ello, alrededor del mundo se están realizando estudios para evaluar los posibles efectos que generaría el cambio climático en la actividad agrícola futura. Lo anterior, incluye la distribución de los cultivos y las variaciones en la dinámica social y comercial alrededor de los cambios geográficos asociados a los mismos. Es así que mediante el análisis de diversos escenarios que contemplan las posibles variaciones en los factores bioclimáticos, como la temperatura y la precipitación, que el modelaje computacional ha permitido a los investigadores en la actualidad ofrecer algunas pautas para adaptación al cambio climático, como por ejemplo: el uso de otras variedades que sean más resistentes a choques térmicos y sequías; un mejor manejo del agua para prevenir la erosión y lixiviación de nutrientes durante épocas de gran precipitación, y cambios en la ubicación de las zonas de producción agrícola (4).

Dentro de los estudios realizados que contemplan el efecto del cambio climático, en el caso del continente asiático, se ha tratado de mejorar la confiabilidad de predicción del clima y la información necesaria para elaborar estrategias para el sector agrícola que permitan la adaptación y la mitigación al cambio climático en la región del Monsoon en el sureste de Asia (5). De igual forma se ha explorado la influencia del cambio climático en las áreas adecuadas para el crecimiento del cultivo de arroz, sistemas para el mismo y los requerimientos hídricos del arroz durante las temporadas de cosechas para los períodos de tiempo pasados (1951 a 2010) y futuros (2011 a 2100) (6). Asimismo se han estudiado los posibles impactos del cambio climático en la producción de maíz para África y América Latina para el 2055, utilizando métodos de alta resolución para generar datos diarios del clima y simular un modelo para el cultivo del maíz y así generar estrategias de mitigación (7).

En función de este tipo de iniciativas de trabajo, un tipo de modelación que se está utilizando actualmente para determinar los posibles efectos del cambio climático sobre la agricultura es MaxEnt, herramienta computacional basada en probabilidades que mediante un conjunto de muestras de distribución en una zona, un conjunto de características en la misma (8) y un grupo de algoritmos se puede determinar la probabilidad de existencia de una especie en una determinada zona de estudio. Dentro de los estudios que se han hecho a nivel mundial utilizando la herramienta anteriormente mencionada, se encuentra la elaboración de mapas de distribución del cultivo de café para diversos escenarios de cambio climático (9,10) y la posible distribución de cultivos de granos básicos (11).

En el caso particular de Costa Rica, se han realizado estudios que consideran la evaluación de modelos para la posible modelación de precipitación y temperatura en Latinoamérica (12), sin embargo no se han realizado investigaciones que contemplen la utilización del modelaje usando variables bioclimáticas como medio para determinar la posible distribución de áreas de cultivos bajo escenarios de cambio climático.

De forma similar, debido a la gran amenaza futura para el sector agrícola y el impacto actual de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) sobre la sociedad costarricense, este tipo de estudios se ven de importancia. La economía rural, la responsabilidad sobre un porcentaje de los indicadores económicos internos y la dinámica

social del país todavía dependen en alto grado de este sector productivo. Por ejemplo, los ingresos correspondientes al mercadeo y venta de productos como café, arroz, piña y caña de azúcar son importantes para mantener la estabilidad de la economía interna, considerando que la participación de la actividad agrícola de estos cultivos en el valor agregado agropecuario (VAA) para el 2015 fue de 4.2%, 2.2%, 31.2% y 4.1% respectivamente (13), correspondiente a más de la mitad del VAA de las actividades primarias del sector agropecuario del país y las cuales aportaron para el mismo año un 8.0% al producto interno bruto (PIB) (14). De esta forma, es necesario contemplar los posibles efectos que el cambio climático pueda generar sobre estos cultivos y sobre la distribución de los mismos, de forma que se puedan generar medidas de adaptabilidad constantes. Es necesario recordar que los cambios en la distribución de cultivos en el país pueden incidir directamente en los modelos socioeconómicos y el estilo de vida de las futuras generaciones de costarricenses.

Es por ello que el presente estudio es de gran relevancia, ya que permite responder a la pregunta: ¿Existirán cambios en la distribución y la amenaza (cambios en distribución espacial y reducción de área óptima) de algunos cultivos agrícolas debido a los efectos del cambio climático en Costa Rica a través del tiempo?. Esta pregunta permite el análisis de los efectos debido a la potencial distribución geográfica de los cultivos sobre la actividad agrícola del país. Lo anterior, además de generar información con la cual se puede realizar la toma de decisiones, también permite elaborar estrategias para mitigar el efecto del cambio climático sobre el sector agrícola de Costa Rica.

Considerando lo anterior, el objetivo general de esta investigación fue evaluar mediante el modelo de máxima entropía la distribución actual y potencial de las áreas con probabilidad alta de sostener los cultivos de piña, café, arroz y caña de azúcar bajo el marco de cuatro escenarios de cambio climático para Costa Rica en el año 2070. La escogencia de este año se basa en las proyecciones disponibles para capas bioclimáticas según recomendación del IPCC (ver “executive summary” en AR5). Collins et al. (15) establecen que, con una alta confianza, sería alrededor de ese año que las curvas de emisión de carbono más promisorias (las de la RCP 2.6) se estabilizarían. Por tanto, para poder seguir en la línea base de trabajo internacional se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar y seleccionar las variables bioclimáticas que mejor expliquen la distribución actual de cada cultivo a estudiar.
2. Analizar el cambio de área potencial asociado con la distribución de los cultivos a estudiar.
3. Evaluar la amenaza para los cultivos seleccionados según los diversos escenarios de cambio climático.
4. Determinar el posible efecto de la distribución de los cultivos seleccionados sobre la cobertura boscosa actual del país.

En el apartado de anexos del presente documento se incluye información complementaria a los resultados presentados en el capítulo 2 y que corresponden a los rasters de probabilidad de distribución, análisis estadísticos realizados, escenarios elaborados a partir de variaciones en precipitación y temperatura, y el porcentaje de área que abarca cada cultivo en relación con el territorio nacional según los escenarios de cambio climático estudiados.

### **Referencias Bibliográficas**

1. Wreford A, Moran D, Adger N. Climate Change and Agriculture: Impacts, Adaptation and Mitigation. Source OECD Agriculture & Food, Volume 9. 2010. i-139 p.
2. FAO. Climate change and food security: risks and responses [Internet]. Roma; 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/82129a98-8338-45e5-a2cd-8eda4184550f/>
3. Villalobos R, Retana J. Efecto del Cambio Climático en la Agricultura. Experiencias en Costa Rica. Gestión de Desarrollo. Instituto Meteorológico Nacional. 1999.
4. Howden SM, Soussana J-F, Tubiello FN, Chhetri N, Dunlop M, Meinke H. Adapting agriculture to climate change. Proc Natl Acad Sci [Internet]. 2007 Dec 11;104(50):19691–6. Disponible en: <http://www.pnas.org/content/104/50/19691.full.pdf>
5. Tanaka K, Kiura T. An Elucidation System for the Climatic Change Effect on Agriculture in the Asian Monsoon Region. 2015;1–7.
6. Ye Q, Yang X, Dai S, Chen G, Li Y, Zhang C. Effects of climate change on suitable rice cropping areas, cropping systems and crop water requirements in southern China. Agric Water Manag [Internet]. Elsevier B.V.; 2015;159:35–44. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377415300135>

7. Jones PG, Thornton PK. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Glob Environ Chang.* 2003;13(1):51–9.
8. Phillips S, Dudík M, Schapire R. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proc Twenty-First Int Conf Mach Learn [Internet]*. 2004;655–62. Disponible en: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1015412>
9. Ovalle-Rivera O, Läderach P, Bunn C, Obersteiner M, Schroth G. Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. *PLoS One [Internet]*. 2015;10(4):e0124155. Disponible en: <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0124155>
10. Laderach P, Lundy M, Jarvis A, Ramirez J, Portilla EP, Schepp K, et al. Predicted Impact of Climate Change on Coffee Supply Chains. In: Leal Filho W, editor. *The Economic, Social and Political Elements of Climate Change [Internet]*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2011. p. 703–23. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14776-0\\_42](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14776-0_42)
11. Evangelista P, Young N, Burnett J. How will climate change spatially affect agriculture production in Ethiopia? Case studies of important cereal crops. 2013;855–73.
12. Hidalgo HG, Alfaro EJ. Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America. *Int J Climatol.* 2015;35(12):3397–421.
13. Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuario [SEPSA]. *Boletín Estadístico Agropecuario N°26*. San José, Costa Rica; 2016.
14. Rodríguez G, Valverde M. *Informe de Gestión del Sector Agropecuario y el Desarrollo de los Territorios Rurales*. San José, Costa Rica; 2016.
15. Collins M, Knutti R, Arblaste J, Dufresne J-L, Fichet T, Friedlingstein P, et al. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]*. Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA; 2013.

## **CAPÍTULO 2. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS**

### **Distribución potencial de tres cultivos agrícolas en Costa Rica bajo escenarios de cambio climático: implicaciones de manejo agroforestal y desarrollo socioeconómico**

#### **RESUMEN**

El análisis aplicado del cambio climático sobre actividades humanas ha cobrado relevancia en los últimos años. Su efecto sobre los sectores agrícolas en países en desarrollo es importante para delinear estrategias de adaptación futura. En este trabajo se han evaluado las distribuciones actuales y potenciales futuras bajo un marco de modelaje ecológico para nichos de arroz, caña de azúcar y piña en Costa Rica. Los resultados sugieren que, para los tres cultivos, las zonas con la mayor probabilidad de efecto negativo corresponden a ambientes rurales. Para el cultivo de arroz, únicamente dos escenarios futuros muestran un mayor traslape con la cobertura boscosa del país, en el caso de caña de azúcar, todos los escenarios futuros presentan un mayor traslape con la cobertura boscosa, mientras que el cultivo de piña muestra una tendencia inversa con menor traslape. Las variaciones puntuales de la temperatura media anual y la precipitación anual no presentan un patrón definido. La presente investigación demuestra la importancia de la modelación de escenarios de cambio climático como herramienta para evaluar el potencial efecto de este fenómeno sobre cultivos agrícolas, con su respectiva repercusión a nivel social y ambiental.

**Palabras claves:** arroz, caña de azúcar, Maxent, modelación ecológica, piña.

#### **ABSTRACT**

The applied study of climate change on human activities has gained relevance in recent years. Its effect over the agricultural zones of developing countries is important to establish future adaptation strategies. In this work, current and future potential distributions under the framework of niche modeling of rice, sugarcane and pineapple for Costa Rica were evaluated. The results suggest that for all three crops, the areas with higher probability of a

negative effect correspond to rural environments. For rice, only two future scenarios show a higher overlap with the country's forest cover; for sugarcane, all future scenarios show a higher overlap with the forest cover; while pineapple shows the opposite pattern. The exploration of the variation of mean annual temperature and annual precipitation did not showed a specific pattern. The actual investigation proves the importance of climate change scenarios as a tool for evaluating the potential effect of this phenomenon over agricultural crops, with its repercussions at social and environmental level.

**Keywords:** Ecological modeling, Maxent, pineapple, rice, sugarcane.

## Introducción

Las variaciones climáticas contemporáneas repercuten profundamente sobre aspectos primordiales de nuestro estilo de vida y algunos autores han planteado que los enfoques actuales de acción están limitados por la naturaleza misma de los problemas (ver [1]). Es así que la atribución de estas variaciones no puede caer únicamente en la naturaleza, ya que las acciones humanas ciertamente han promovido en gran medida la alteración climática.

En este sentido, uno de los causantes de alteraciones en el régimen climático es la producción agrícola (2), actividad que genera importantes emisiones de gases de efecto invernadero. Durante el período del 2001 al 2011, la emisión anual de GEI a nivel mundial por parte de la actividad agrícola aumentó un 14%, pasando de 4 684 a 5 335 Mt CO<sub>2</sub> eq (3). Si bien en las últimas décadas se han implementado modernas técnicas de producción que minimizan los efectos sobre el ambiente (e.g. [4]), el sector agrícola todavía presenta grandes desafíos para optimizar su producción en un marco de sostenibilidad.

Sin embargo, también es una actividad que se ve afectada por el cambio climático. La reducción de los rendimientos de los cultivos, la pérdida de los mismos así como la propagación de malezas, plagas y enfermedades debido a la alteración de la temperatura y la precipitación, son algunas de las consecuencias que afectan a este sector (5). Lo anterior es de gran relevancia considerando el rápido crecimiento de la población a nivel mundial, la cual para el año 2050 se estima que llegue a 9.2 billones de habitantes (6), y por ende la



demanda de alimento se vería intensificada. Al considerar los potenciales cambios, en escenarios futuros se podría dar competencia por aquellas áreas aptas para la agricultura debido a la expansión de las zonas urbanas, lo cual implica un cambio directo en el uso del suelo.

Frente a este panorama, se torna necesario modelar el efecto potencial sobre la agricultura bajo un marco de clima cambiante. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) recomienda el uso de escenarios de cambio climático para tratar de identificar posibles comportamientos del clima para años futuros (7) que permitan la elaboración de planes climáticos de adaptación. Si lo anterior se integra con una estrategia de comunicación sobre cambio climático (ver [8]) se podría más efectivamente lograr la implementación de acciones climáticas (9), y generar una estrategia de desarrollo aplicable en el contexto rural en el que ocurre la agricultura (10).

Partiendo del desarrollo de varios modelos de probabilidad asociados con potenciales cambios en la distribución de tres cultivos en Costa Rica, el presente trabajo se ha diseñado bajo un marco de cambio climático y alfabetización temática. El objetivo principal ha sido evaluar, mediante el modelo de máxima entropía, la distribución actual y potencial de las áreas con probabilidad alta de sostener los cultivos de piña, arroz y caña de azúcar en Costa Rica bajo el marco de cuatro escenarios de cambio climático. Se espera que este trabajo pueda ofrecer insumos metodológicos sobre la aplicación de técnicas y enfoques de modelaje en el contexto de cambio climático, así como ofrecer parámetros e información que permita a tomadores de decisión mejorar la planificación de las acciones climáticas para zonas y grupos sociales con mayor potencial de amenaza climática.

### **Metodología**

La recopilación de la información y el análisis espacial fue llevada a cabo durante el 2015. Para el análisis se tomó como área de estudio el territorio continental de Costa Rica elaborando primero una malla de puntos de ubicación de los cultivos de arroz, caña de azúcar y piña (Fig 1) mediante el programa Arcgis v. 10.2. En dicho mapa se presenta la distribución actual (período 2012 a 2015) de los tres cultivos, utilizado como línea de

referencia en todos los análisis posteriores. La selección de estos cultivos se ha llevado a cabo con base en criterios de importancia comercial y consumo interno (ver [11]).

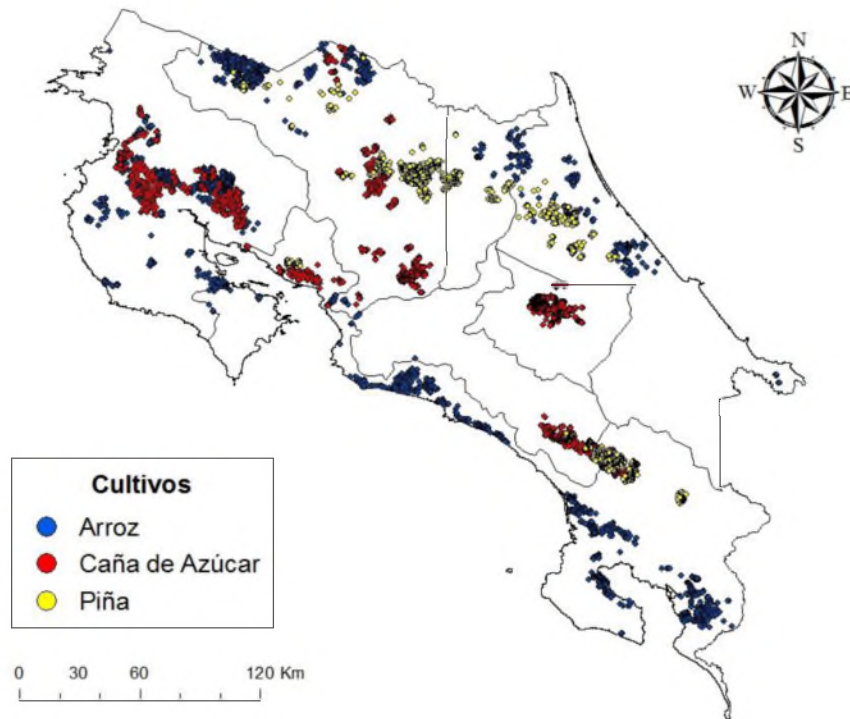


Figura 1. Distribución actual de los tres cultivos estudiados en el presente proyecto

Para el cultivo de arroz se localizaron 1 476 puntos individuales mediante la base de datos del proyecto de investigación “Generación y evaluación de un sistema de información geográfica para mapear áreas de plantas cultivadas, sus parientes silvestres y el posible flujo de genes entre ambas: el caso del Arroz en Costa Rica” el cual fue desarrollado por la Universidad de Costa Rica en conjunto con el proyecto Lac-Biosafety (12). En el caso de la caña de azúcar se utilizaron los mapas de distribución elaborados por la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA), e imágenes satelitales para obtener un total de 1 537 puntos de ubicación geográfica. Finalmente, para el cultivo de piña se localizaron 1 100 puntos individuales a partir de imágenes satelitales y de la localización de permisos para cultivo de piña otorgados por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA) de Costa Rica durante el período 2005-2015.

Se obtuvieron rasters bioclimáticos a una resolución espacial de 30 arc-segundos (aproximadamente 1 km<sup>2</sup>) para 1) la condición climática base (con datos entre 1950-2000), 2) el modelo de elevación digital y 3) dos modelos de circulación general (MCG) conocidos como Miroc-esm y Hadgem2-es. Estos dos modelos se han escogido por su aplicabilidad en el análisis de sistemas ecológicos y por la probabilidad alta de seguir siendo utilizados en un futuro para este tipo de análisis (ver [13,14]). El primer modelo predice escenarios relativamente secos (altos niveles de incremento en lluvias y altos niveles de incremento en temperatura) mientras que el segundo predice escenarios moderados (niveles moderados de reducción en lluvias y niveles moderados de incremento en temperatura). No se analizó un modelo de predicción húmeda debido a que según el AR5 (15) la probabilidad alta para Costa Rica indica escenarios futuros de sequía.

La información de la condición base y la elevación se obtuvo de WorldClim ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)). Los datos de los MCG se obtuvieron del repositorio climático del Programa de Investigación en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS por sus siglas en inglés) del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR por sus siglas en inglés, [www.cgiar.org](http://www.cgiar.org)). Además de los dos MCG, se seleccionaron las sendas representativas de concentración (RCP por sus siglas en inglés) denominadas 4.5 y 6.0 debido a su aplicabilidad real en el campo agrícola (ver [16]). Collins et al. (17) establecen que estas dos sendas asumen curvas moderadas de emisión de carbono con estabilización hacia el año 2150, mientras que la 8.5 lo hace para el año 2250 (extrapolación de baja confianza) y la 2.6 para el año 2070 (irrealista). De esta forma, para esta investigación se evaluaron cuatro modelos de proyección diferentes para el año 2070 (promedio del 2061-2080) que corresponden a las combinaciones entre los dos MCG y los dos RCP.

Las diferentes variables bioclimáticas fueron pre-evaluadas con el objetivo de ganar poder de análisis e interpretación con un número menor de variables en los modelos. Para lo anterior se realizó una primera modelación con el programa MaxEnt v. 3.3.3k, para el escenario actual e incluyendo las 19 variables bioclimáticas de WorldClim y la variable elevación. Lo anterior se realizó con 100 repeticiones bajo un entorno estadístico de selección aleatoria con reemplazo (bootstrap). Una vez hecha esta modelación, se utilizó un

porcentaje acumulado mínimo de 70% de variabilidad explicada, permitiendo determinar que las variables que en conjunto acumulan este valor son las que mejor explican la distribución actual de cada cultivo. Este último enfoque se basa en la recomendación de la acumulación mínima de variabilidad para matrices multivariadas ofrecida por Jolliffe (18).

Para evitar alta correlación entre las variables, se analizaron las correlaciones lineales ( $r$  de Pearson) para todas las combinaciones (con la herramienta Arcgis v.10.2) y se utilizó un valor de corte de 0.80 para determinar una alta correlación. En este caso, para aquellas combinaciones con un valor de correlación arriba del valor de corte, únicamente se tomó en cuenta la variable con el mayor porcentaje de variabilidad en el modelo. De esta forma, las variables eliminadas fueron reemplazadas en el modelo por la siguiente variable bioclimática con mayor relevancia. Una vez seleccionadas las variables para el modelaje asociado con cada cultivo, se procedió con las modelaciones de los cuatro escenarios de cambio climático. Estas últimas fueron realizadas en cada caso bajo las mismas condiciones de modelación con que fue realizado el modelo actual.

Debido a que los modelos muestran variabilidad intrínseca asociada a cada iteración y el resultado final de una modelación muestra en realidad un promedio del conjunto, se utilizó el umbral logístico de entrenamiento del percentil 10 para determinar, de la forma más conservadora, la extensión máxima de distribución asociada con cada cultivo, tanto para la determinación bioclimática de la distribución actual como para cada uno de los cuatro modelos evaluados. De esta forma se redujo considerablemente la probabilidad asociada con un error tipo I. En todos los casos, a partir de los modelos conservadores definidos se crearon rasters binarios de alta probabilidad bioclimática asociada con la distribución de cada cultivo que se utilizaron para el cálculo de diferencias entre cada modelo de cambio climático y los modelos actuales, y para la elaboración de mapas de ganancia y pérdida de área proyectada en cada caso. Lo anterior también se hizo para modelos en donde se modificó arbitrariamente en incrementos/disminuciones de 5% y 10% los valores de precipitación y temperatura promedio de los rasters de condición actual, esto último con el fin de evaluar si se podría dar algún tipo de direccionalidad al cambio de área a partir de estas dos variables.

Posteriormente, y para determinar el impacto futuro de los cambios potenciales en la distribución de los cultivos a nivel cantonal, se utilizaron los rasters de probabilidad en conjunto con la capa de cantones del país para crear escenarios de amenaza (cambios en distribución espacial y reducción de área óptima). Para lo anterior, se llevaron a cabo una serie de pruebas de bondad de ajuste utilizando como parámetro de análisis el valor correspondiente a la probabilidad de presencia del cultivo en el cantón, para determinar diferencias de amenaza a nivel cantonal para cada cultivo actualmente y en el futuro.

Finalmente, se realizaron los cálculos para determinar el potencial traslape de las nuevas áreas de distribución de cada cultivo con las zonas actuales de bosque. Para ello se utilizó la distribución del bosque (categorías de bosque maduro, secundario, deciduo y manglar únicamente) en Costa Rica al año 2012 (19).

### Resultados

De las veinte variables consideradas para la modelación, se identificó que cinco de ellas, para el caso de arroz y caña, y siete para el caso de piña, fueron suficientes para explicar arriba de un 70% de la variabilidad de distribución de la matriz de datos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variables bioclimáticas y de elevación utilizadas en la modelación de la distribución actual y futura de los cultivos de arroz, caña de azúcar y piña.

Variables	Cultivo
Elevación	Arroz
Rango medio diario	Arroz, Caña de azúcar, Piña
Isotermabilidad	Caña de azúcar, Piña
Estacionalidad de la temperatura	Arroz, Piña
Temperatura máxima del mes más caliente	Piña
Temperatura media del trimestre más seco	Arroz
Precipitación del mes más húmedo	Caña de Azúcar, Piña
Precipitación del trimestre más seco	Piña
Precipitación del trimestre más caliente	Arroz, Caña de azúcar
Precipitación del trimestre más frío	Caña de azúcar, Piña

Las áreas bajo la curva obtenidas para los modelos correspondientes a la condición actual y a los escenarios futuros para todos los cultivos estudiados se estimaron en todos los casos

en valores arriba de 0.91. De acuerdo a Baldwin (20) la magnitud de tales valores refleja la precisión de los modelos, donde valores alrededor de 0.50 indican un ajuste mejor de lo esperado por azar, y valores cercanos a 1.00 indican un perfecto ajuste.

El análisis estadístico realizado para determinar diferencias entre la distribución potencial de los cultivos a partir de los cuatro modelos utilizados no mostró que alguno de ellos estuviera asociado con un patrón de sobre o sub estimación claro (Cuadro 2). De esta forma, los cuatro modelos se consideraron equivalentes en su proyección futura, a pesar de las diferencias intrínsecas entre ellos. Las figuras 2, 3 y 4 muestran el resultado espacial proyectado de ganancia y pérdida de áreas aptas asociadas a la probabilidad de existencia de los cultivos para los cuatro escenarios estudiados. En la figura 5 se observa que el mayor potencial de pérdida espacial asociada con parámetros bioclimáticos y de elevación se ha dado para los casos de la piña y el arroz, en donde la mayoría de los modelos proyectan cambios netos negativos en las áreas con alta probabilidad de sostener el cultivo en comparación con el modelo actual. Para el caso de la caña de azúcar, la proyección es inversa y más bien se observó un cambio neto proyectado de carácter positivo, lo cual implica que existe una probabilidad alta de que en el futuro existan más zonas en Costa Rica con condiciones bioclimáticas aptas para este cultivo.

Cuadro 2. Cantidad de pixeles correspondientes a la condición de presencia de los cultivos a nivel nacional para los cuatro escenarios de cambio climático evaluados en el presente estudio.

Cultivo	Número de pixeles			
	Miroc 4.5	Miroc 6.0	Hadgem 4.5	Hadgem 6.0
Arroz	11185	11179	12303	11486
Caña de azúcar	16476	17561	21475	21690
Piña	6604	7682	7698	7918

Por su parte, el análisis sobre el cultivo de arroz no presentó diferencias significativas en distribución potencial entre el escenario actual y los escenarios futuros. En el caso de la caña de azúcar, las proyecciones asociadas con cinco de las siete provincias de Costa Rica presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), mientras que para la piña estas diferencias se encontraron en únicamente dos provincias.

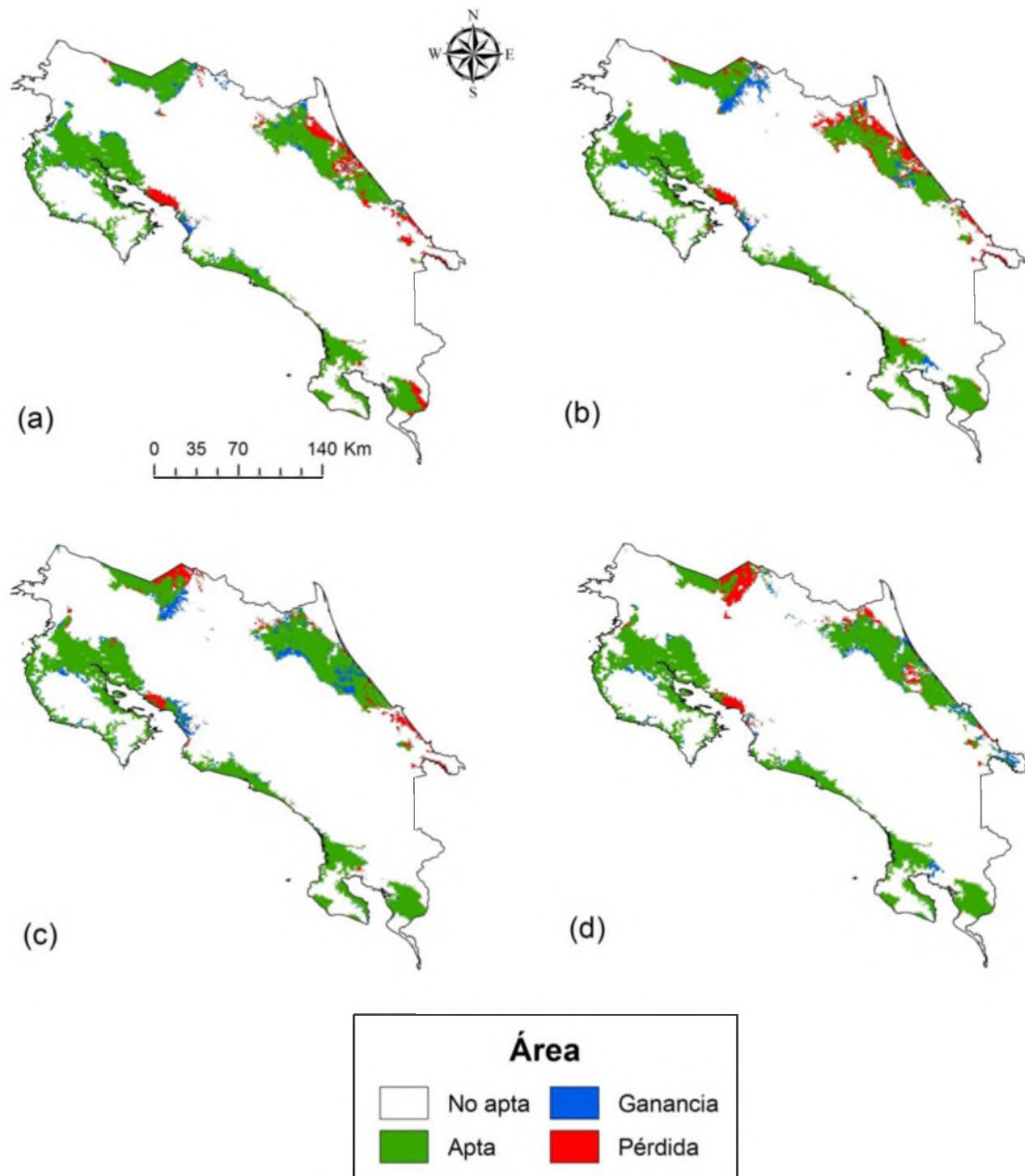


Figura 2. Áreas de ganancia o pérdida proyectadas al año 2070 con alta probabilidad bioclimática de cambio asociado para el cultivo del arroz en los cuatro escenarios de cambio climático estudiados: (a) Miroc 4.5, (b) Miroc 6.0, (c) Hadgem 4.5 y (d) Hadgem 6.0.

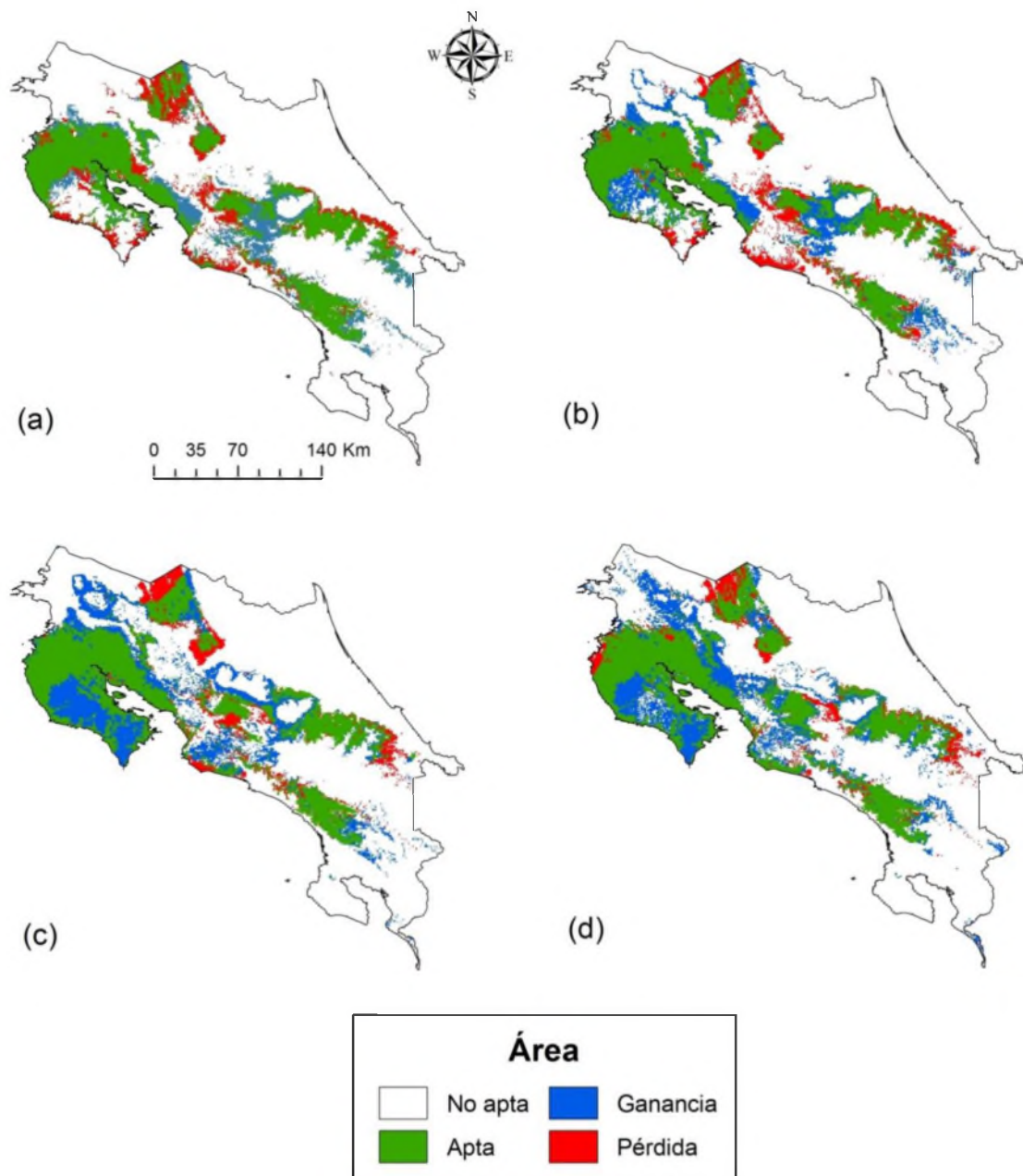


Figura 3. Áreas de ganancia o pérdida proyectadas al año 2070 con alta probabilidad bioclimática de cambio asociado para el cultivo de caña de azúcar en los cuatro escenarios de cambio climático estudiados: (a) Miroc 4.5, (b) Miroc 6.0, (c) Hadgem 4.5 y (d) Hadgem 6.0.



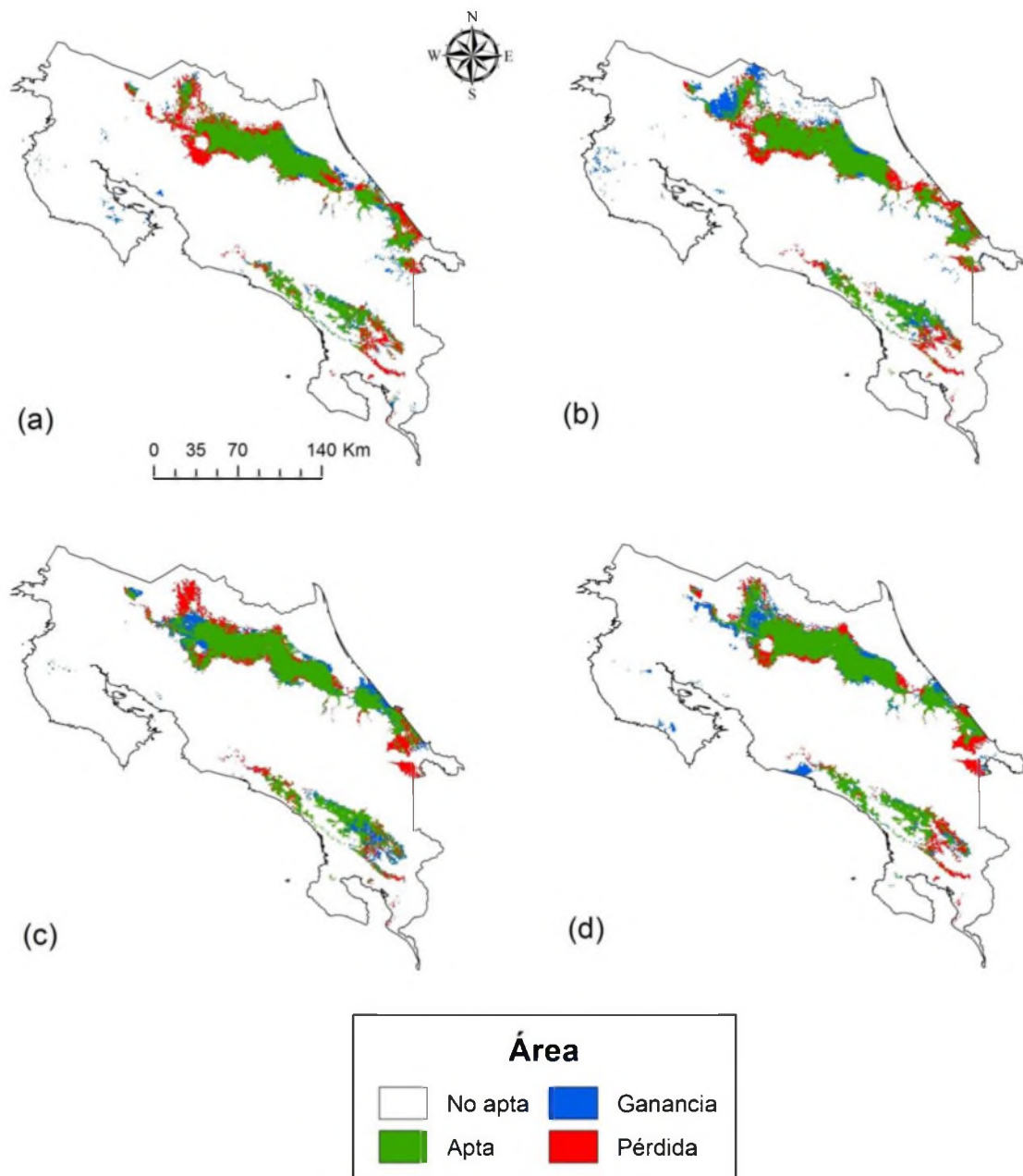


Figura 4. Áreas de ganancia o pérdida proyectadas al año 2070 con alta probabilidad bioclimática de cambio asociado para el cultivo de piña en los cuatro escenarios de cambio climático estudiados: (a) Miroc 4.5, (b) Miroc 6.0, (c) Hadgem 4.5 y (d) Hadgem 6.0.

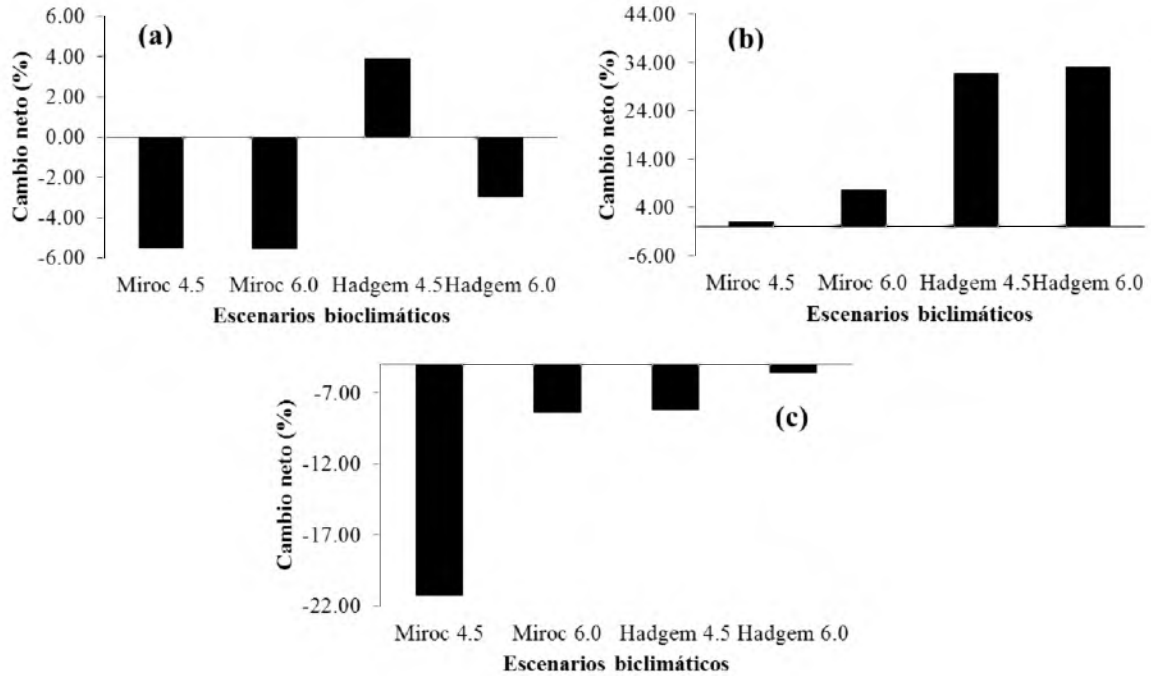


Figura 5. Cambio neto de posibles áreas aptas para el cultivo de (a) arroz, (b) caña de azúcar y (c) piña para los escenarios futuros evaluados en este estudio.

Para la probabilidad de presencia del cultivo de arroz por cantón, los resultados indicaron que no existen diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) entre el modelo actual de distribución y los modelos futuros. Para caña de azúcar y piña, sin embargo, sí se encontraron diferencias ( $p < 0.05$ ) para los dos modelos Hadgem y para Miroc 6.0 (Figuras 6, 7, 8). En la mayoría de los casos disminuyó la cantidad de cantones con probabilidad alta de presencia y aumentó la cantidad de cantones con probabilidad baja.

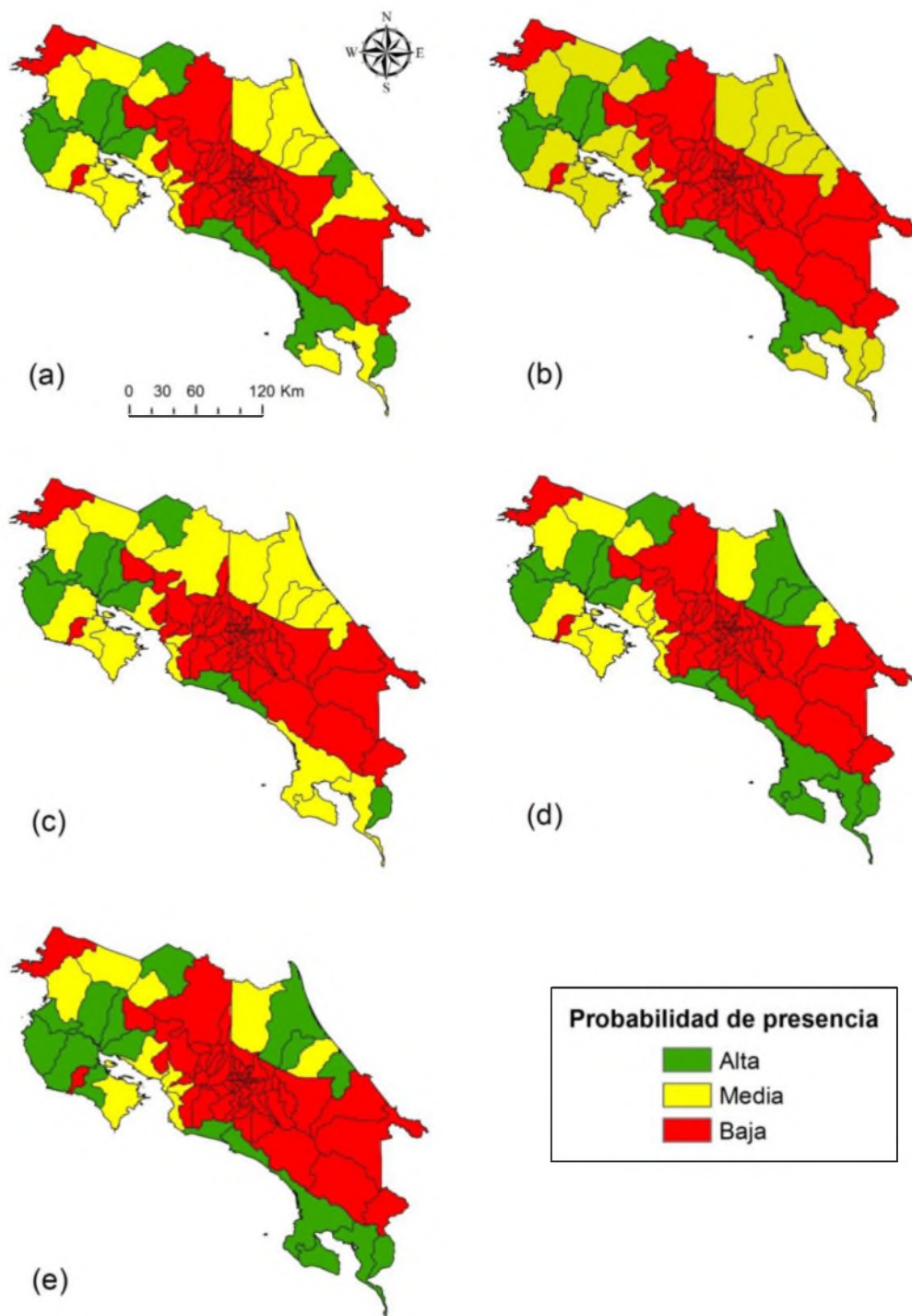


Figura 6. Probabilidad de presencia del arroz por cantón para (a) la condición actual y los cuatro escenarios evaluados: (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0.

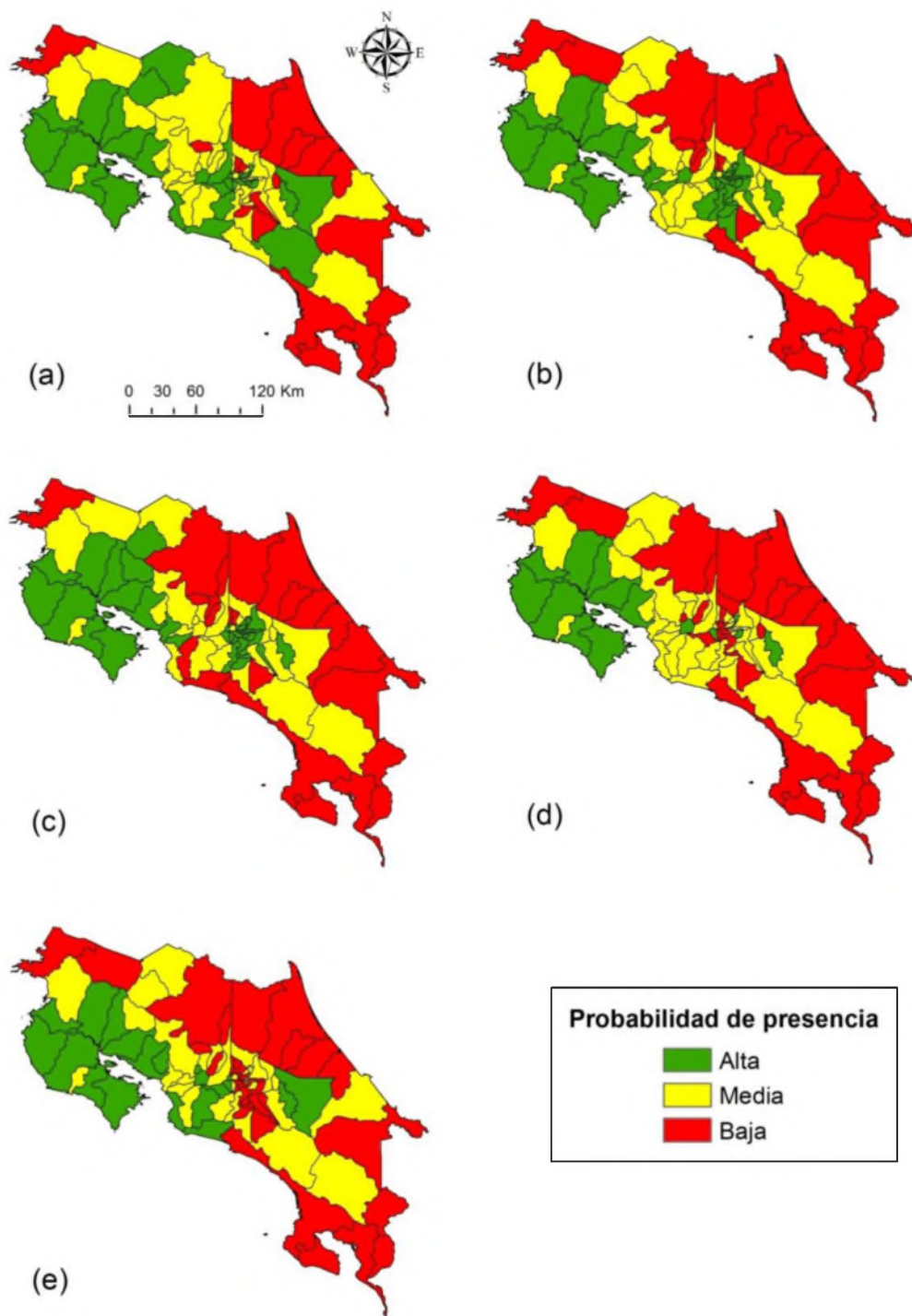


Figura 7. Probabilidad de presencia de caña de azúcar por cantón para (a) la condición actual y los cuatro escenarios evaluados: (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0.

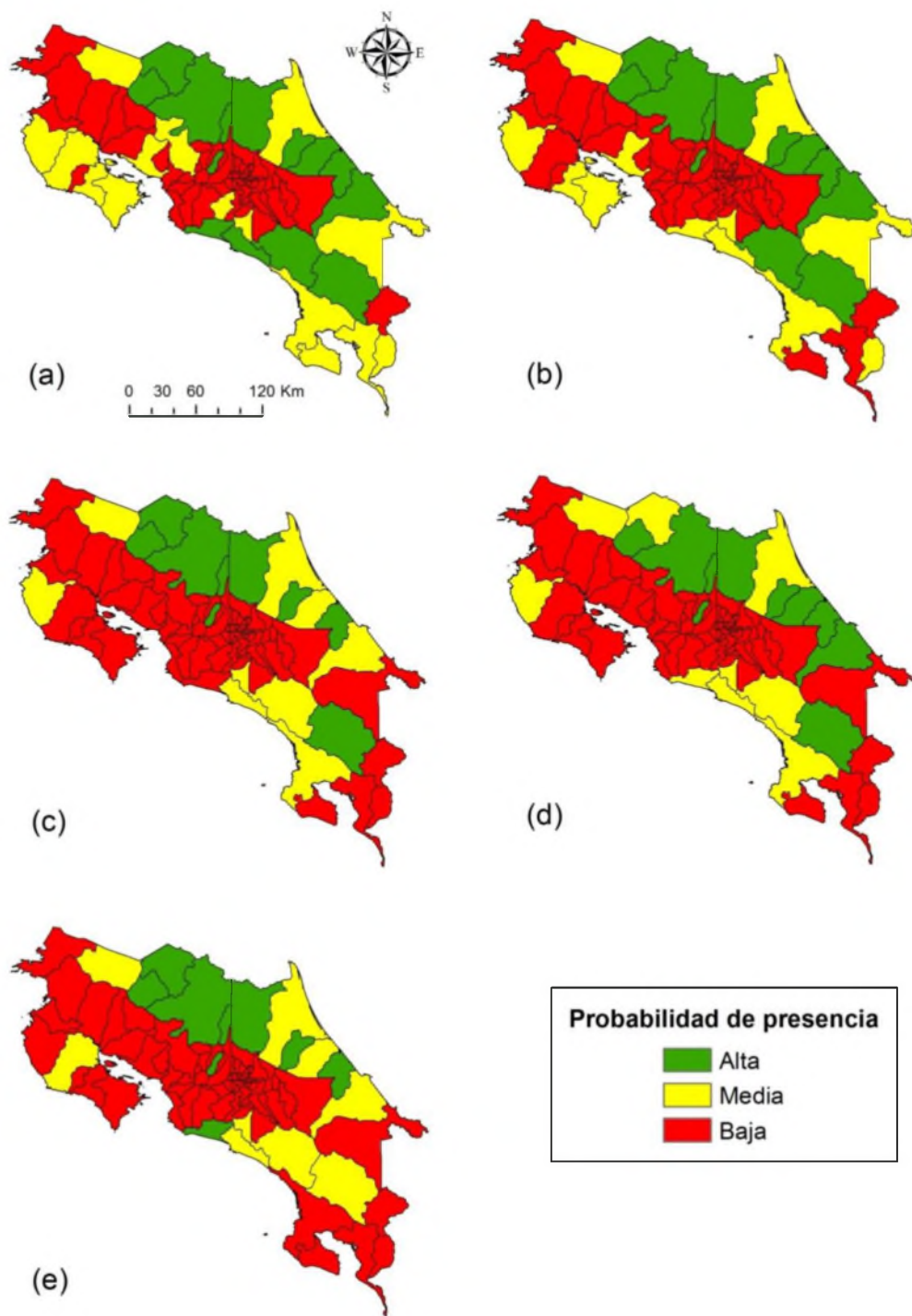


Figura 8. Probabilidad de presencia de piña por cantón para (a) la condición actual y los cuatro escenarios evaluados: (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0.



Considerando los efectos negativos de la deforestación y los potenciales servicios ecosistémicos de los bosques, es relevante analizar también el posible efecto de la expansión o reducción del área apta para los cultivos agrícolas sobre la cobertura boscosa del país. En las figuras 9, 10 y 11 se presenta el potencial traslape de los cultivos de arroz, caña de azúcar y piña sobre la cobertura boscosa actual. De los tres cultivos, se observó que el arroz es el único que no presentó una tendencia definida en todos los modelos, donde Hadgem 4.5 y 6.0 contemplaron un mayor traslape. En el caso de caña de azúcar, todos los modelos mostraron que se podría dar una reducción de la cobertura boscosa si las áreas aptas para la producción de caña fueran a utilizarse para tal actividad. Caso contrario, en piña se presentó una reducción en el traslape de las potenciales zonas de cultivo con el bosque.

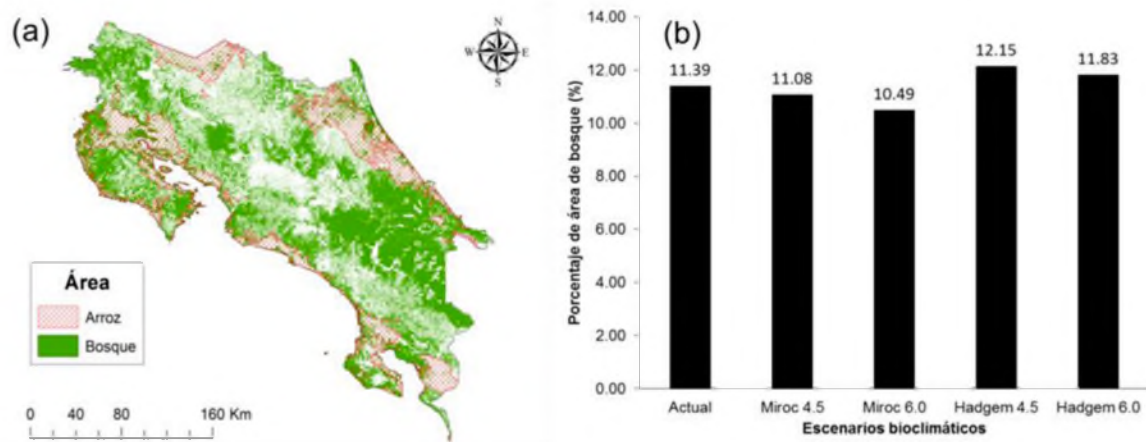


Figura 9. Traslape de cultivo de arroz y cobertura boscosa del país para: (a) condición actual y (b) escenarios futuros de cambio climático evaluados en la presente investigación.

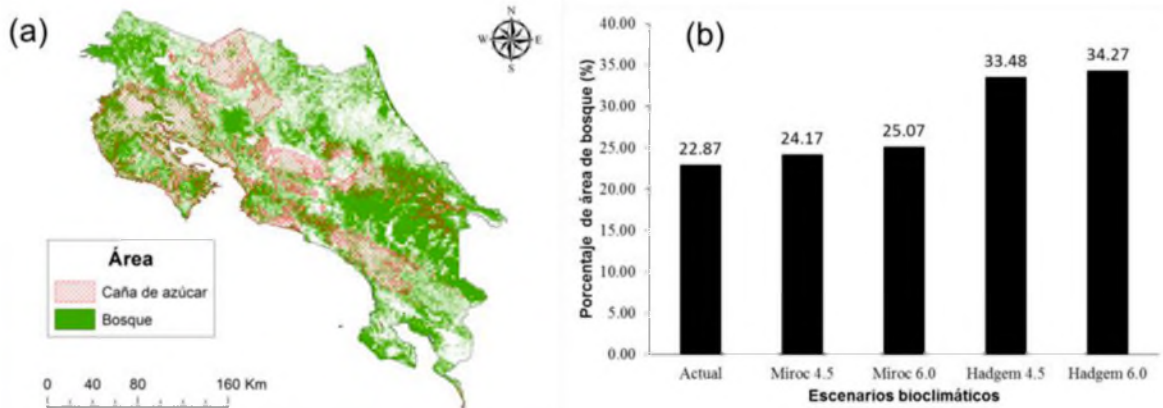


Figura 10. Traslape de cultivo de caña de azúcar y cobertura boscosa del país para: (a) condición actual y (b) escenarios futuros de cambio climático evaluados en la presente investigación.

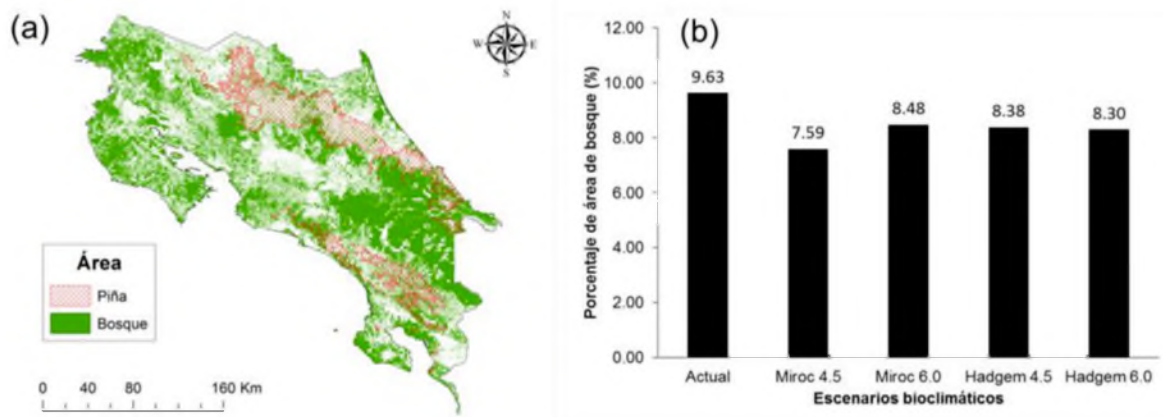


Figura 11. Traslape de cultivo de piña y cobertura boscosa del país para: (a) condición actual y (b) escenarios futuros de cambio climático evaluados en la presente investigación.

## Discusión

Es claro que los modelos evaluados, para lo cuales no se encontraron diferencias, y los resultados obtenidos en este trabajo tienen que verse como insumos de análisis con potencial de integración en el complicado contexto de cambio climático. De esta forma, el presente trabajo se constituye como un referente temporal de análisis ingenieril de tres sistemas agrícolas en Costa Rica. Sin embargo, es importante recordar que este tipo de

metodologías conllevan errores de enfoque y omisión claros y que el modelaje es únicamente una herramienta parsimoniosa e importante de análisis contextual. En este sentido, es necesario usar cautela al analizar los resultados obtenidos.

A pesar de lo anterior, es relevante observar que la precipitación fue la variable de importancia en común entre todos los cultivos analizados. En el caso del arroz y la piña, las otras variables fueron la temperatura y elevación; mientras que para la caña de azúcar se encontró, además de lo anterior que la relación entre el rango de temperatura diario sobre el rango anual (isotermalidad) tuvo un peso importante sobre el modelo correspondiente. Si bien, el resultado anterior de forma intuitiva podría explicar la distribución actual de los tres cultivos (p. ej. el arroz se siembra en Costa Rica en zonas bajas, húmedas y con alta temperatura, ver [21]), esto también tiene una implicación en el afinamiento de los modelos mismos. Por ejemplo, cuando se hicieron una serie de modelos extra ajustando en incrementos o disminuciones de un 5 y 10% los parámetros de precipitación y temperatura (no mencionados antes) no se encontraron patrones definidos de ganancia o pérdida de área potencial en ninguno de los tres cultivos estudiados. Lo anterior sugiere que a pesar de que los modelos iniciales encontraron que la precipitación y la temperatura de un sitio fueron importantes, es más realista pensar que son las interacciones entre variables o la información indirecta extraíble a partir de ellas (p. ej. la isotermalidad) los parámetros que en realidad tienen utilidad en este tipo de modelaje.

Independientemente de lo anterior, los modelos evaluados en este trabajo han indicado que las regiones pacífico y caribe muestran una alta probabilidad de sostener el cultivo del arroz. A pesar de ello, se observó que en el pacífico central existe la probabilidad de reducción en el área apta para este cultivo. Para Guanacaste, donde se produce la mayor parte de este grano (22), no se observó un alto potencial de pérdida. En el caso de la caña de azúcar, se observó que la provincia de Guanacaste es la que parece tener el mayor potencial de expansión de área óptima según los escenarios de cambio climático al año 2070. Para el cultivo de piña, el único que mostró un cambio neto negativo de área apta en los modelos, ésta reducción parece centrarse en las zonas bajas y húmedas del país (p. ej. zonas norte, caribe y sur). Si bien lo anterior puede ser explicado porque los potenciales aumentos en la precipitación no son suficientes para contrarrestar los proyectados aumentos



en la temperatura, también muestra un riesgo asociado con este cultivo ya que son precisamente estas zonas bajas y húmedas en donde se cultiva la piña actualmente. A pesar de ello, las zonas de San Carlos y Buenos Aires de Puntarenas, donde se concentra la producción de piña (alrededor de 60%, ver [22]), no mostraron patrones negativos de efecto en los modelos.

Las implicaciones de este estudio son de alta relevancia para la planificación y adaptación climática en zonas rurales, las cuales con frecuencia tienen una alta dependencia económica de la producción agrícola. Con bajos índices de desarrollo económico y social, aquellos cantones que se encuentran más distanciados del centro del país, tales como las zonas fronterizas del norte y el sur son los que afrontan mayores dificultades (23). Lo anterior muchas veces crea un panorama en el que estas zonas carecen de las herramientas suficientes para adaptarse a los cambios de clima (24) y por ello optan por producir cultivos menos adecuados, de bajo rendimiento o precios fluctuantes y en muchos casos abandonan la actividad agrícola, con las claras consecuencias socioeconómicas que esto conlleva.

Si bien los habitantes de cualquier territorio tienen un derecho natural de decidir sobre sus actividades redituables, los diferentes países están en la necesidad de equilibrar esta situación para mantener la producción agrícola. Lo anterior no solamente permite que la estrategia se dirija hacia la seguridad alimentaria de la población, sino que ofrece posibilidades de ingresos económicos a sectores sociales que por razones socioculturales se sienten más a gusto con estilos de vida rurales y en comunidades pequeñas alejadas de las urbes. Sin embargo, es únicamente con planificación y con la utilización de herramientas como las provistas en este trabajo, dentro de un marco de análisis integrado con otra serie de elementos, que se puede si quiera intentar mantener ese equilibrio en la estrategia de desarrollo nacional.

De esa forma, cuando se analizan aspectos como el uso apropiado del suelo y la conservación de zonas boscosas, es claro que algunas políticas económicas como el programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA) y restricciones en el cambio de uso de suelo forestal han permitido el mantenimiento de importantes servicios ecosistémicos (ver [25]). Sin embargo, al ver el potencial del sector agrícola de traslaparse, por razones bioclimáticas, con estos bosques, es también claro que esta relación entre el agro y el

manejo forestal, debe de tratarse en las estrategias de planificación. En el caso del presente trabajo, los resultados mostraron que el manglar es el tipo de bosque con mayor potencial de traslape con alguno de los tres cultivos analizados. Lo anterior ya ha sido anotado por Arguedas (26) para el caso de arroz y caña de azúcar y los datos presentados en esta investigación concuerdan con esa apreciación. Es interesante, sin embargo, ver que el mayor potencial de traslape forestal en el caso de la caña de azúcar se dio en el área de Guanacaste, con valores entre 25 y 35% para los cuatro modelos evaluados, y que la piña mostró los valores más bajos de traslape potencial. A pesar de lo anterior, es relevante recordar que en el caso de esta última actividad, el alto uso de fertilizantes y plaguicidas sintéticos tienen un efecto negativo sobre los bosques circundantes.

### Referencias

1. Adger WN, Dessai S, Goulden M, Hulme M, Lorenzoni I, Nelson DR, et al. Are there social limits to adaptation to climate change? *Clim Change*. 2009;93(3-4):335–54.
2. Rosenzweig C. Climate Change and Agriculture. In: Meyers AR, editor. *Extreme Environmental Events: Complexity in Forecasting and Early Warning* [Internet]. New York, NY: Springer New York; 2011. p. 31–41. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6\\_3](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_3)
3. Tubiello F., Salvatore M, Córdor Golec R., Ferrara A, Rossi S, Biancalani R, et al. *Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks 1990-2011 Analysis*. Roma, Italia; 2014.
4. Chowdhury RB, Moore GA. Floating agriculture: A potential cleaner production technique for climate change adaptation and sustainable community development in Bangladesh. *J Clean Prod* [Internet]. Elsevier Ltd; 2014; Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.060>
5. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]. *Impacto del cambio climático en la agricultura* [Internet]. San José, Costa Rica; 2012. Disponible en: [http://www.iica.int/sites/default/files/document/2015-08/nota\\_tecnica\\_03-12.pdf](http://www.iica.int/sites/default/files/document/2015-08/nota_tecnica_03-12.pdf)
6. Bongaarts J. Human population growth and the demographic transition. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* [Internet]. 2009 Sep 21;364(1532):2985 LP – 2990. Disponible en: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/364/1532/2985.abstract>
7. Mitchell JFB, Lowe J, Wood R a, Vellinga M. Extreme events due to human-induced climate change. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2006;364(1845):2117–33.

8. Van der Linden SL, Leiserowitz AA, Feinberg GD, Maibach EW. How to communicate the scientific consensus on climate change: plain facts, pie charts or metaphors? *Clim Change*. 2014;126(1-2):255–62.
9. Vallejo C. El desarrollo de la acción climática: una propuesta ante los INDCs para Costa Rica. *Ambientico* [Internet]. 2016;(258):70–5. Disponible en: <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/art/ambientico/A11.pdf>
10. Molina SA. Desarrollo verde e inclusivo en respuesta al cambio climático. *Ambientico* [Internet]. 2015;(258):24–9. Disponible en: <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/art/ambientico/A4.pdf>
11. Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria [SEPSA]. Boletín Estadístico Agropecuario N°25. San José, Costa Rica; 2015.
12. Sancho F. Generación y evaluación de un sistema de información geográfica para mapear áreas de plantas cultivadas, sus parientes silvestres y el posible flujo de genes entre ambas: el caso de Arroz en Costa Rica. San José, Costa Rica; 2012.
13. EPA. Climate Change in the United States: Benefits of Global Action. United States Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs. 2015; EPA-R-15-001.
14. Betts RA, Golding N, Gonzalez P, Gornall J, Kahana R, Kay G, et al. Climate and land use change impacts on global terrestrial ecosystems and river flows in the HadGEM2-ES Earth system model using the representative concentration pathways. 2015;2000:1317–38.
15. IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland; 2014. 151 p.
16. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]. Modelos de simulación y herramientas de modelaje: elementos conceptuales y sistematización de herramientas para apoyar el análisis de impactos de la variabilidad y el cambio climático sobre las actividades agrícolas. San José, Costa Rica; 2015.
17. Collins M, Knutti R, Arblaster J, Dufresne J-L, Fichet T, Friedlingstein P, et al. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA; 2013.

18. Jolliffe IT. Principal Component Analysis. 2nd ed. New York, NY: Springer-Verlag New York; 2002. 405 p.
19. Fondo de Financiamiento Forestal de Costa Rica [FONAFIFO] y Sistema Nacional de Áreas de Conservación [SINAC]. Mapa de tipos de bosque para Costa Rica [Internet]. 2012. Disponible en: [http://www.sirefor.go.cr/?page\\_id=872](http://www.sirefor.go.cr/?page_id=872)
20. Baldwin R. Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy*. 2009;11(4):854–66.
21. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA]. Manual de recomendaciones del cultivo de arroz. San José, Costa Rica; 2008.
22. Instituto Nacional de Estadísticas [INEC]. VI Censo Nacional Agropecuario [Internet]. San José, Costa Rica; 2015. Disponible en: <http://www.inec.go.cr>
23. Ministerio de Planificación Nacional y Planificación Económica [MIDEPLAN]. Índice de Desarrollo Social 2013. San José, Costa Rica; 2013.
24. Bouroncle C, Imbach P, Läderach P, Rodríguez B, Medellín C, Fung E. La agricultura de Costa Rica y el cambio climático: ¿Dónde están las prioridades para la adaptación? *CGIAR Res Progr Clim Chang Agric Food Secur*. 2014;8.
25. Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano. Armonía con la naturaleza. Vigésimo primer Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Costa Rica; 2015.
26. Arguedas D. Expansión agrícola y urbana devoran manglares del Pacífico. *Semanario Universidad* [Internet]. San José, Costa Rica; 2014 Jul; 2. Disponible en: <http://semanariouniversidad.ucr.cr/pais/expansin-agrcola-y-urbana-devoran-manglares-del-pacifico-2/>

## **Modelado del potencial uso del suelo para la gestión de café (*Coffea arabica*) y el bosque en Costa Rica con base en escenarios de cambio climático**

### **RESUMEN**

Además de la necesidad de reducir sus propias emisiones, el reto del sector agrícola a nivel mundial también es el de adaptarse a un clima más variable. El café es un importante cultivo en Costa Rica basado en todas aquellas zonas cultivadas y el número de familias ligadas a esta actividad y que tienen una larga tradición familiar. En este contexto, el potencial cambio en la distribución de la producción de café basada en escenarios de cambio climático ha sido identificado y dirigido en este estudio. Variables bioclimáticas en conjunto con la elevación fueron utilizadas para evaluar los cambios en las zonas aptas para la producción de café bajo el marco de cuatro escenarios de cambio climático para el año 2070. Los resultados sugieren que las zonas altas tienen una alta probabilidad de ser aptas para el café bajo todos los cuatro escenarios y la no idoneidad parece estar relacionado con las zonas bajas. Todos los cuatro escenarios de cambio climático presentaron un alto traslape entre las zonas aptas futuras para café y las áreas boscosas actuales. Esta investigación sugiere que el manejo a largo plazo de la producción de café en Costa Rica deberá considerar cuidadosamente el cambio climático debido a su potencial de conflicto con otros usos del suelo y las consecuencias socioeconómicas asociadas.

Palabras claves: agricultura, Centroamérica, manejo del cultivo, Maxent, modelaje ecológico

### **ABSTRACT**

Besides the need to reduce its own emissions, the challenge of the agricultural sector worldwide is also to adapt to a changing and more variable climate. Coffee is an important crop in Costa Rica based on cultivated area and on the number of families connected to this activity that has a long historical tradition. In this context, the potential distribution shifts of coffee production based on climate change scenarios has been identified and targeted in this study. Bioclimatic variables along with elevation were used to evaluate changes in suitable areas for coffee production under the framework of four climate change scenarios for the year 2070. Results suggest that highlands have a high probability of being suitable for

coffee under all four scenarios and unsuitability seems to be associated with lowlands. All four climate change scenarios showed high overlap between the projected suitable areas for coffee and current forested areas. This investigation suggests that the long term management of coffee production in Costa Rica should carefully consider climate change given its potential conflict with other land uses and associated socioeconomic implications.

Keywords: agriculture, Central America, crop management, ecological modeling, Maxent

## **Introducción**

El cambio climático está afectando aspectos fundamentales del estilo de vida moderno, incluyendo la agricultura (1). La adaptación de los sistemas agrícolas al cambio climático es de gran importancia para asegurar la seguridad alimentaria, reducción de pobreza y el uso sostenible de los recursos naturales (2,3).

Variables climáticas tales como temperatura y precipitación; así como las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera debido al ser humano imponen fuerzas externas en el desarrollo de los cultivos (4–6). Como consecuencias del último, se han realizado investigaciones las cuales han mostrado que algunos cultivos presentan una alta probabilidad de cambiar su extensión geográfica basada en la idoneidad climática en las próximas décadas. Lo anterior ha sido mostrado tanto para cultivos comerciales (7,8) como para no comerciales (e.g.[9]).

En este sentido, investigadores han desarrollado una serie de programas de cómputo (i.e. ECOCROP, CaNaSTA, DSSAT) destinados a la integración del modelaje ecológico, fisiología vegetal y el planeamiento socioeconómico para demostrar primero los efectos del cambio climático en los cambios de distribución de los cultivos y luego la interpretación de los resultados bajo un contexto de desarrollo. Una popular técnica de modelaje que se utiliza actualmente en el mundo es la del enfoque de máxima entropía (MaxEnt), la cual fue desarrollada originalmente para propósitos ecológicos (10,11); sin embargo, actualmente también está siendo utilizado ampliamente para evaluar la variabilidad geográfica y climática de los cultivos (12).

En el caso de Costa Rica, la agricultura del café ha demostrado tener un impacto positivo sobre el desarrollo económico de las zonas rurales (13) pero poco ha sido publicado en el uso del modelaje ecológico para evaluar cambios potenciales en la distribución óptima de los cultivos. Aunque algunos estudios a gran escala bajo el marco de cambio climático (e.g. [14, 15]) se han elaborado para el cultivo de café; estos no presentan la resolución necesaria a nivel país. Considerando la importancia de integrar factores de cambio climático y el desarrollo económico a diferentes escalas (ver [16]), el IPCC ha incluido cuatro diferentes Sendas Representativas de Concentración (RCP) en su quinto informe en el 2014 (17). Estos RCPs están destinados a proveer a los modeladores con escenarios estándares para el desarrollo de potenciales efectos del cambio climático.

En el presente estudio, se determinaron las potenciales áreas geográficas idóneas para la producción de café en el año 2070 bajo el marco de cuatro escenarios de cambio climático utilizando el protocolo de máxima entropía. Además de contribuir a la limitada información publicada relacionada con este tema para el país y la región de Centro América, este énfasis también contribuye en términos de la generación de información considerando el cambio climático como potencial amenaza para la agricultura en los diferentes cantones del país.

### **Materiales y métodos**

El área de estudio de este trabajo engloba todo el territorio costarricense. Toda la recopilación de la información y el análisis espacial fue elaborada durante el 2015.

Primero, una base de datos de localizaciones pertinentes a las zonas de producción de café fue elaborado utilizando información del año 2012 del Centro de Investigación del Café (CICAFE). Esta base de datos, la cual consiste en 4 034 puntos individuales ubicados a través de todo Costa Rica (ver Figura 1), fue utilizada para generar un mapa base de la distribución del cultivo y que sería usada en posteriores análisis. Dicho mapa fue contemplado en la presente investigación para representar la distribución actual de las zonas del cultivo de café en el país.

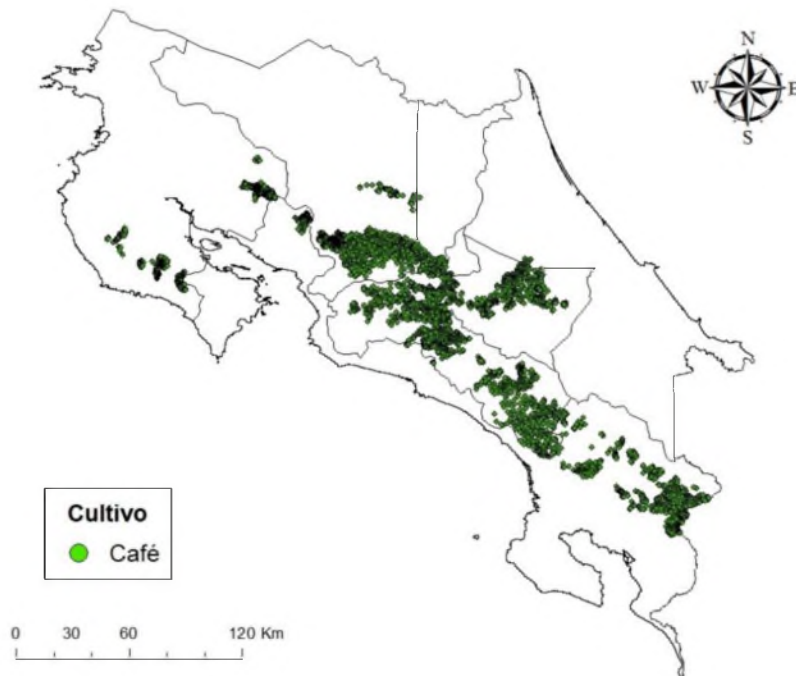


Figura 1. Distribución geográfica actual del cultivo de café en Costa Rica.

Segundo, una serie de rasters bioclimáticos a una resolución espacial de 30 arc-segundos (aproximadamente 1 Km<sup>2</sup>) para 1) la condición actual climática mundial (promedio entre 1950-2000) y 2) para los cuatro escenarios centrados en el 2070 (promedio del 2061-2080) fueron obtenidos de las bases de datos del WorldClim ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)) y el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR por sus siglas en inglés, [www.cgiar.org](http://www.cgiar.org)) respectivamente. Para el último, dos Modelos de Circulación General (MCG), Miroc-ESM y Hadgem2-ES; y dos Sendas Representativas de Concentración (RCP por sus siglas en inglés), la opción 4.5 y 6.0, fueron seleccionadas.

Se seleccionaron los dos MCG por su aplicabilidad en el análisis de sistemas ecológicos y por la probabilidad alta de seguir siendo utilizados en un futuro para este tipo de análisis (ver [18,19]). Miroc-esm predice escenarios relativamente secos (altos niveles de incremento en lluvias y altos niveles de incremento en temperatura) mientras que Hadgem2-es predice escenarios moderados (niveles moderados de reducción en lluvias y niveles moderados de incremento en temperatura). Respecto a los RCP seleccionados Collins et al. (20) establecen que estas dos sendas asumen curvas moderadas de emisión de



carbono con estabilización hacia el año 2150, mientras que la 8.5 lo hace para el año 2250 (extrapolación de baja confianza) y la 2.6 para el año 2070 (irrealista).

Tercero, para evaluar cuales variables (representados por rasters individuales) podrían ser considerados para el modelaje, una evaluación preliminar de su importancia relativa de predicción se realizó con base en el mapa de distribución original. Para esta labor, todos los rasters de las 19 variables bioclimáticas originales más un extra que considera elevación fueron cortados para la zona de Costa Rica y cargados en el software Maxent (v.3.3.3k) para generar un primer modelo ecológico del café basado en cien réplicas. Utilizando el modelo obtenido, las variables no correlacionadas que acumularon hasta un 70% de su variabilidad asociada con la capacidad predictiva del modelo, fueron seleccionadas (temperatura mínima del mes más frío, elevación y rango medio diurno). Para el paso anterior, luego de los resultados originales obtenidos y que consideraban todas las variables, un análisis estadístico para determinar la correlación de las variables fue elaborado en ArcGIS (v.10.2) con un valor de corte de 0.80 para el valor de correlación de Pearson's  $r$  asociado con las variables de menor rango. En este sentido, si dos variables presentaban un valor de  $r$  mayor a 0.80, la que mostraba el valor acumulativo menor de acuerdo al modelo original de Maxent era eliminada.

Cuarto, las variables seleccionadas fueron utilizadas para la construcción de todos los modelos presentados aquí y así reducir errores en los cálculos que podrían ser producto de diferentes sets de variables usados para diferentes escenarios. En todos los modelos ecológicos, la mayoría de las opciones estándar fueron utilizadas. Cuando todos los rasters de probabilidad fueron obtenidos, el umbral de presencia del percentil 10 fue utilizado para definir las zonas aptas/no idóneas. Con esa información, se elaboró una serie de mapas binarios para determinar las zonas donde se tiene una alta probabilidad ecológica para la expansión y contracción del cultivo. Además, con el fin de proporcionar detalles para el gobierno local, se usó una capa de cantones en conjunto con los rasters de probabilidad, generando así una categoría de idoneidad para la producción del cultivo en comparación con la condición actual.

Quinto, se obtuvo el porcentaje de traslape entre las zonas de cultivo y la cobertura actual de bosque mediante la generación de una cobertura boscosa que consideraba los tipos de

bosque maduro, secundario, deciduo y manglar. Esta cobertura boscosa fue creada a partir de la base de datos del Sistema de Información de Recursos Forestales de Costa Rica (SIREFOR) del año 2012. Esta comparación fue hecha para determinar la posible amenaza de la expansión del cultivo de café sobre la cobertura boscosa del país basado en los modelos de cambio climático elaborados.

### **Resultados y discusión**

Para el café en Costa Rica, la evaluación preliminar de las variables bioclimáticas mostró que únicamente tres variables son requeridas para explicar más del 70% de la estructura asociada con la distribución actual del cultivo. De hecho, las tres variables seleccionadas explican más del 85% de la variabilidad asociada con los modelos mostrados. Este resultado es un indicio de la homogeneidad ecológica y climática para las áreas utilizadas para la producción de café, las cuales en el caso de Costa Rica corresponden típicamente a elevaciones intermedias (1000 a 2000 msnm) en las zonas tropicales húmedas y lluviosas. Los valores del área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) obtenidos para el modelo de condición actual y los cuatro escenarios fueron calculados en 0.86. De acuerdo a Baldwin (21), al ser un valor tan alto refleja la potencial precisión de los modelos, ya que valores de AUC cerca de 0.50 indica un ajuste mejor que lo esperado al azar, y por ende, los valores cercanos a 1.00 reflejan un perfecto ajuste.

La Figura 2 muestra que todos los modelos evaluados, y contrastados con el modelo actual de las zonas de café, predijeron una expansión en la parte noroeste del país y una contracción a lo largo de las zonas altas del Caribe. Interesantemente, dicha expansión de las potenciales áreas para la producción de café se localiza principalmente en elevaciones intermedias del lado barlovento tanto en la cordillera de Tilarán y Guanacaste, donde actualmente existen parques nacionales. Los modelos Miroc fueron los que mostraron una mayor contracción de las áreas aptas; sin embargo, para todos los cuatro escenarios evaluados, el cambio neto predicho fue positivo con valores entre tres y ocho por ciento de ganancia neta en las áreas aptas para la producción de café para la segunda parte del siglo XXI.

Como la agricultura relacionada con el café es una actividad económica relevante en las zonas rurales presentes en las elevaciones intermedias de Costa Rica (22), es importante denotar que los potenciales cambios en las áreas óptimas para la producción de este cultivo pueden impactar el estilo de vida de la población en dichas áreas. Para todos los futuros escenarios, la zona central de Costa Rica mostró una alta probabilidad para continuar sosteniendo el cultivo (Figura 3). Interesantemente, el mismo patrón fue observado para las regiones donde la producción de café ya es una actividad agrícola de gran relevancia (e.g los cantones de Tarrazú, Naranjo y Poás). Esto es de gran relevancia ya que son áreas estratégicas para el intercambio internacional del café de Costa Rica (23).

Es muy probable que en las zonas predichas que no sean aptas, se dé el caso de agricultores que continúen sembrando café, inclusive si las condiciones climáticas no favorecen su producción. Esto puede relacionarse con el valor cultural de este cultivo presente en la memoria de los costarricenses, ya que fue un motor para la construcción de la identidad nacional (24). Aunque el café representa la mayor extensión de cualquier cultivo agrícola (84 133,1 ha) (25), las exportaciones de café representan 0.34% de producción interna bruta (PIB) y 2.46% del total de ingresos de los productos exportados en el 2014 (22). Esta poca importancia que tiene el café sobre la economía nacional en un contexto general, aún sigue siendo relevante para la economía para todos aquellos agricultores y sus familias, cuyos cultivos representan en el mismo año cerca de una tercera parte del total nacional (25).

Como se observa en la Figura 4, todos los modelos estudiados durante esta investigación mostraron un incremento en el traslape entre las zonas aptas para la producción de café y la cobertura actual de bosque en Costa Rica. En este sentido, es importante considerar la viabilidad ambiental para futuras producciones de café, debido a que muchas de las zonas altas donde ocurre el traslape, proveen de una serie de servicios de ecosistemas claves y sirven de refugio para la preservación de la biodiversidad del país (ver [26]). También, los alrededores de la capital del país, donde la producción ha sido clave para la actividad económica a través de los años, han sido transformados en áreas urbanas. Esta situación probablemente continuará en detrimento de las áreas aptas para la producción de café, lo cual podría generar presión para entrar en las zonas de los bosques nacionales localizados en altitudes altas. Lo anterior es una problemática considerando que la calidad y cantidad

del agua disponible en el área metropolitana de Costa Rica depende de la protección de estas zonas forestales, poniendo en riesgo el bienestar a largo plazo de más del 60% de la población del país.

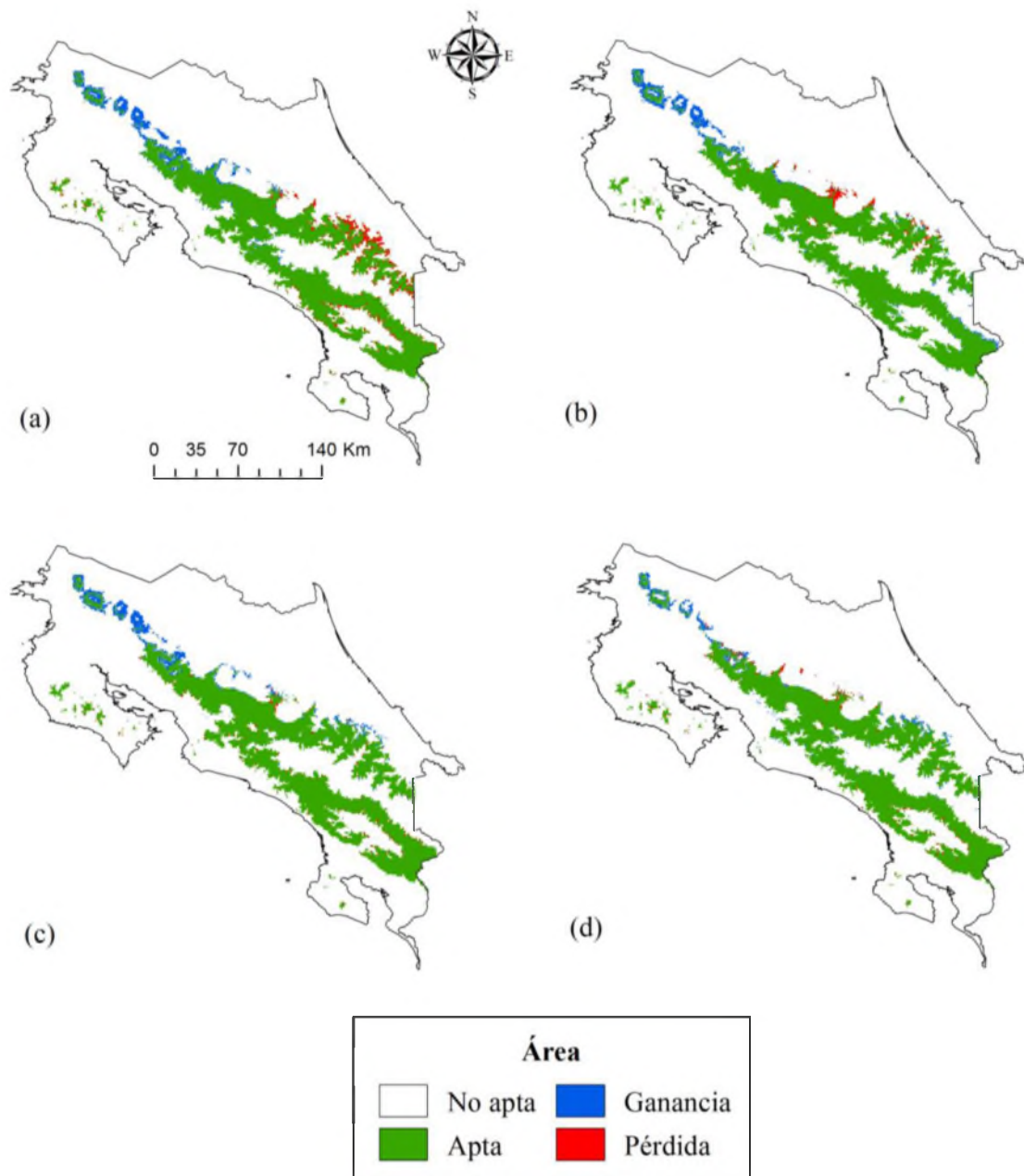


Figura 2. Mapas de Costa Rica donde se muestra la ganancia y pérdida de áreas aptas para la producción de café de acuerdo a los escenarios para el 2070 evaluados en la presente investigación: (a) Miroc 4.5, (b) Miroc 6.0, (c) Hadgem 4.5 y (d) Hadgem 6.0

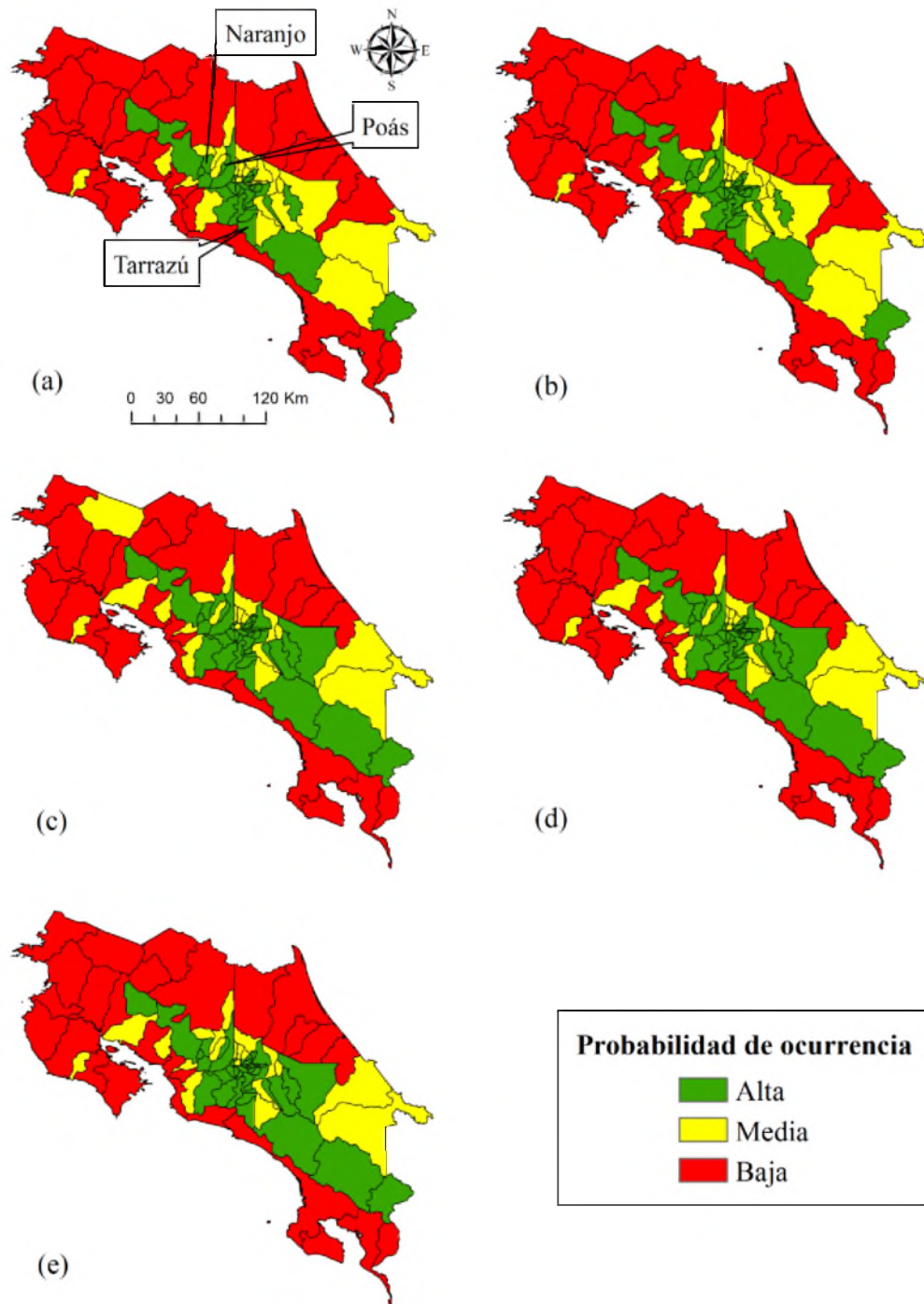


Figura 3. Mapas de Costa Rica donde se muestra la probabilidad de ocurrencia para la producción de café de acuerdo con (a) escenario actual, (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0. La división cantonal es presentada al igual que tres cantones de gran relevancia para la producción de café se etiquetan en la parte superior.

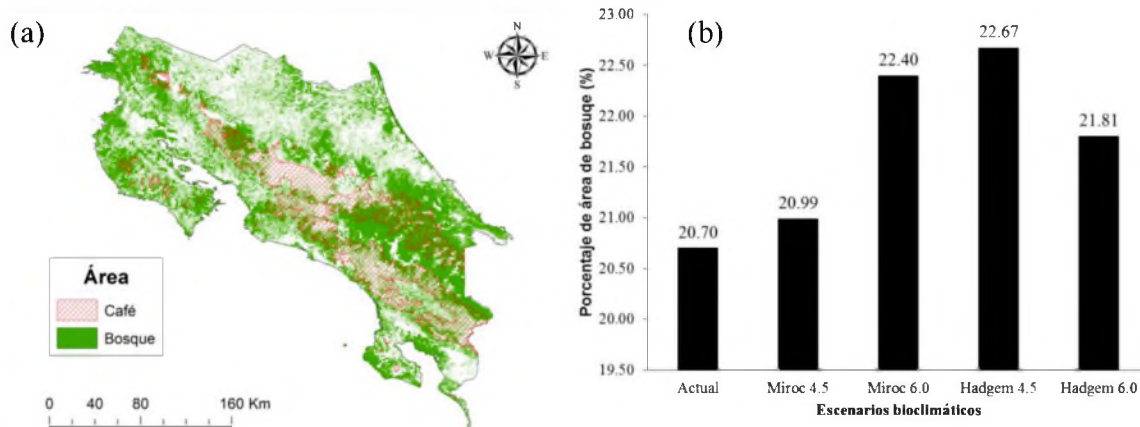


Figura 4. Mapa de Costa Rica donde se muestra el traslape entre (a) las áreas de producción de café y la cobertura de bosque actual y (b) el porcentaje de traslape calculado para todos los cuatro escenarios de cambio climático evaluados.

Una fuente adicional de conflicto puede ser la protección de los bosques en aquellas zonas privadas de una manera económicamente eficiente. Desde 1997 Costa Rica estableció el programa de Pagos de Servicios Ambientales (PSA), el primero en su clase en un país en vías de desarrollo. Los PSAs han sido una estrategia clave para reducir la deforestación en las últimas dos décadas (27). Sin embargo, en una situación de alta competencia con la producción agrícola y considerando el costo de oportunidad para la protección de los bosques, cada vez es más difícil su gestión en conjunto con sus bienes y servicios asociados (28). En este sentido, los resultados presentados son de gran ayuda para informar a los diferentes actores dedicados a la conservación y el cambio del uso del suelo asociados con nuevos escenarios climáticos.

Finalmente, el modelaje ecológico desarrollado en este estudio tiene una gran relevancia para el sector cafetalero de Costa Rica, ya que muestra potenciales áreas aptas para la producción de dicho cultivo bajo el marco de cambio climático. El último es relevante para una exitosa adaptación del sector agrícola a las presiones impulsadas por el cambio climático. En este sentido, el uso de herramientas tales como las que se utilizaron en este estudio en conjunto con la generación de políticas públicas podría proveer de estrategias efectivas para la preparación de la cadena de suministro del café de Costa Rica en caso de dichos cambios. Estos tipos de enfoques podrían apoyar la importancia del sector cafetalero sobre la economía rural y su relevancia cultural de este producto en Costa Rica.

## Conclusiones

Es muy probable, que de acuerdo al enfoque y los modelos utilizados en esta investigación, que las zonas altas de Costa Rica continuarán siendo zonas aptas para la producción de café en el futuro. Sin embargo, estos modelos mostraron una serie de expansiones y contracciones que podrían ser retos para la población local que depende del café como fuente de ingresos. El cambio neto de la potencial área para la producción de café se prevé que será positiva, y las áreas protegidas en las elevaciones más altas parecen que serán zonas con una posible expansión. El tipo de modelaje utilizado en este estudio podría proveer de elementos importantes para la implementación de estrategias de manejo y adaptación para el actual y futuro uso del suelo en Costa Rica. En el caso del café, dicha situación puede promover en el mantenimiento del sector debido a su importancia histórica; sin embargo, en el caso de los bosques de zonas altas, esto puede desencadenar una señal de atención debido a su creciente riesgo en el futuro. De una forma u otra, el enfoque usado en la presente investigación puede ser utilizado para un correcto planeamiento de las actividades relacionadas con el café y el fomento de prácticas sostenibles para la actividad cafetalera.

## Referencias

1. Rosenzweig C. Climate Change and Agriculture. In: Meyers AR, editor. Extreme Environmental Events: Complexity in Forecasting and Early Warning [Internet]. New York, NY: Springer New York; 2011. p. 31–41. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6\\_3](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_3)
2. FAO. State of the world's forests 2016 [Internet]. Roma: FAO; 2016. 125 p. Disponible en: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/6547e46e-3e6f-4c47-8dcb-8c5c19a18e00/>
3. Smith, P., y Olesen JE. Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture. *J Agric Sci* [Internet]. 2010;148(5):543–52. Disponible en: <http://dx.doi.org.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr:2048/10.1017/S0021859610000341>
4. Streck NA. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature on crop growth, development, and yield. *Ciência Rural*. 2005;35(3):730–40.
5. Porter JR, Semenov MA. Crop responses to climatic variation. *Philos Trans R Soc B: Biol Sci* [Internet]. 2005. Nov 29; 360 (1463): 2021–35. Disponible en: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/360/1463/2021.abstract>

6. Benton J. Weather and Climatic Conditions. In: Plant Nutrition and Soil Fertility Manual, Second Edition [Internet]. CRC Press; 2012. p. 223–8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1201/b11577-34>
7. Evangelista P, Young N, Burnett J. How will climate change spatially affect agriculture production in Ethiopia ? Case studies of important cereal crops. 2013;855–73.
8. Davis AP, Gole TW, Baena S, Moat J. The Impact of Climate Change on Indigenous Arabica Coffee ( *Coffea arabica* ): Predicting Future Trends and Identifying Priorities. 2012;7(11):10–4.
9. Khanum R, Mumtaz a. S, Kumar S. Predicting impacts of climate change on medicinal asclepiads of Pakistan using Maxent modeling. Acta Oecologica [Internet]. Elsevier Masson SAS; 2013;49:23–31. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actao.2013.02.007>
10. Loarie SR, Carter BE, Hayhoe K, McMahon S, Moe R, Charles A, et al. Climate Change and the Future of California’s Endemic Flora. 2008;3(6).
11. Van Gils H, Westinga E, Carafa M, Antonucci A, Ciaschetti G. Where the bears roam in Majella National Park, Italy. J Nat Conserv [Internet]. Elsevier GmbH.; 2014;22(1):23–34. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnc.2013.08.001>
12. Estes LD, Bradley BA, Beukes H, Hole DG, Lau M, Oppenheimer MG, et al. Comparing mechanistic and empirical model projections of crop suitability and productivity: implications for ecological forecasting. Glob Ecol Biogeogr [Internet]. 2013 Aug 1;22(8):1007–18. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1111/geb.12034>
13. Wollni M, Zeller M. Do farmers benefit from participating in specialty markets and cooperatives? The case of coffee marketing in Costa Rica. Agric Econ [Internet]. Blackwell Publishing Inc; 2007 Sep 1;37(2-3):243–8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-0862.2007.00270.x>
14. Ovalle-Rivera O, Läderach P, Bunn C, Obersteiner M, Schroth G. Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. PLoS One [Internet]. 2015;10(4):e0124155. Disponible en: <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0124155>
15. Bunn C, Läderach P, Pérez Jimenez JG, Montagnon C, Schilling T. Multiclass Classification of Agro-Ecological Zones for Arabica Coffee: An Improved Understanding of the Impacts of Climate Change. PLoS One [Internet]. Public Library of Science; 2015 Oct 27;10(10):e0140490. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1371%2Fjournal.pone.0140490>



16. Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, et al. The representative concentration pathways: An overview. *Climate Change*. 2011;109(1):5–31.
17. IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland; 2014. 151 p.
18. EPA. *Climate Change in the United States: Benefits of Global Action*. United States Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs. 2015; EPA-R-15-001 2015.
19. Betts RA, Golding N, Gonzalez P, Gornall J, Kahana R, Kay G, et al. Climate and land use change impacts on global terrestrial ecosystems and river flows in the HadGEM2-ES Earth system model using the representative concentration pathways. 2015;2000:1317–38.
20. Collins M, Knutti R, Arblaste J, Dufresne J-L, Fichet T, Friedlingstein P, et al. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [[Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge. United Kingdom y New York, NY, USA; 2013.
21. Baldwin R. Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy*. 2009;11(4):854–66.
22. Instituto del Café de Costa Rica [ICAFFE]. *Informe Sobre La Actividad Cafetalera De Costa Rica*. Heredia, Costa Rica; 2015.
23. Instituto del Café de Costa Rica [ICAFFE]. *Regiones Cafetaleras de Costa Rica* [Internet]. 2016. Disponible en: <http://www.icafe.cr/nuestro-cafe/regiones-cafetaleras/>
24. Peters G, Samper M. *Café de Costa Rica: un viaje a lo largo de su historia*. Instituto del Café de Costa Rica; 2001. 196 p.
25. Instituto Nacional de Estadísticas [INEC]. *VI Censo Nacional Agropecuario* [Internet]. San José, Costa Rica; 2015. Disponible en: <http://www.inec.go.cr>
26. Laderach P, Lundy M, Jarvis A, Ramirez J, Portilla EP, Schepp K, et al. Predicted Impact of Climate Change on Coffee Supply Chains. In: Leal Filho W, editor. *The Economic, Social and Political Elements of Climate Change* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2011. p. 703–23. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14776-0\\_42](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14776-0_42)

27. Camacho A. Un nudo de cooperación técnica sobre: los servicios ambientales en Costa Rica. San José, Costa Rica: IICA; 2010. 96 p.

28. Molina SA, Pérez JP, Herrera Ugalde ME. Assessment of environmental payments on indigenous territories: The case of Cabecar-Talamanca, Costa Rica. *Ecosyst Serv* [Internet]. 2014 Jun;8:35–43. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041614000072>

### **CAPÍTULO 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Con la elaboración del presente estudio se determinó que de acuerdo a escenarios futuros de cambio climático, la distribución geográfica de las zonas óptimas de los cultivos de arroz, café, caña de azúcar y piña tendrá una alta probabilidad de verse modificada, por lo que se espera que existan repercusiones en el ámbito socio-económico y ambiental del país. Sin embargo, durante el proceso de realización de esta investigación se identificaron otros aspectos que son necesarios considerar.

Falta información y estudios relacionados con el potencial efecto del cambio climático sobre la actividad agrícola del país. Si bien es cierto que Costa Rica es un país que ha realizado esfuerzos por mitigar los efectos del cambio climático, a nivel institucional y universitario no fue posible ubicar estudios que contemplen posibles escenarios futuros y sus efectos sobre la agricultura en Costa Rica. En la mayoría de casos, se elaboraron investigaciones en el ámbito meteorológico, por lo cual se consideran únicamente las variaciones en temperatura y precipitación. Además, generalmente los escenarios futuros utilizados no corresponden a los que presenta el Grupo Intergubernamental de Experto de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) en su quinto informe, que resultan ser los más actualizados.

Durante la obtención de la información relacionada con la ubicación y distribución de los cultivos de interés, se percibió que no existe un ente que centralice este tipo de información. Se esperaba que el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), al ser la institución encargada de la actividad agrícola del país, tuviera este tipo de información; no obstante, la misma se encuentra dispersa entre las demás instituciones que se dedican a cada cultivo en particular. Además, no todas las instituciones tienen este tipo de información, tal es el caso de Corporación Arrocera Nacional (CONARROZ); o bien, no la comparten a menos que sea con proyectos que involucren a la institución como tal, como fue el caso de Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA).

Se comprendió que en este tipo de investigaciones lo ideal es tener un equipo de trabajo interdisciplinario de manera tal que los resultados obtenidos no sean analizados únicamente desde el punto de vista de la ingeniería agrícola, sino que existan otros profesionales

involucrados para que se logren abarcar más ámbitos, en los cuales el ingeniero agrícola debido a su formación le es difícil incursionar (i.e determinación de modelos de circulación general para Costa Rica); además de permitir la participación de los agricultores debido a su posición e importancia en la toma de decisiones, pues son estos los directamente afectados por los efectos del cambio climático.

Considerando el análisis anterior se concluye que:

- Hay ausencia de información relacionada con los potenciales efectos de cambio climático a futuro sobre la actividad agrícola costarricense por parte del sector institucional del país.
- No existe una colaboración adecuada entre las instituciones dedicadas a la actividad agrícola en la temática del compartir información, lo que dificulta la obtención de datos para la elaboración de este tipo de estudios.
- La competencia del uso del suelo es un tema de gran importancia a discutir debido a su potencial efecto sobre la seguridad alimentaria y protección ambiental del país.
- En las investigaciones que contemplen el cambio climático como eje temático se debe de tener claro donde comienza y termina la labor del ingeniero agrícola, de manera que se pueda complementar con las demás disciplinas del conocimiento para llegar a una solución más integral.

Por lo tanto, tomando en consideración los puntos anteriormente expresados, se presentan las siguientes recomendaciones:

1. El Ministerio de Agricultura y Ganadería debe asumir su rol como ente rector para la coordinación de las labores correspondientes a la facilitación y generación de la información correspondiente a la actividad agrícola.
2. Mejorar el aspecto correspondiente al intercambio de información entre las instituciones dedicadas a la actividad agrícola con el Ministerio de Agricultura y Ganadería, para que la información se mantenga centralizada, permitiendo así que la labor de búsqueda y obtención de esta por parte de investigadores o estudiantes que necesitan de la misma sea más rápida y sencilla.

3. Se recomienda la elaboración de este tipo de estudios entre la Universidad de Costa Rica y el Ministerio de Agricultura y Ganadería para que se pueda avanzar en esta temática, promoviendo la generación de información que sería de gran utilidad para el sector agrícola del país, en la toma de decisiones para la mitigación de los potenciales efectos del cambio climático sobre el sector agrícola, sus consecuencias sobre la condición socio-económica del país y la definición de políticas estatales a corto, mediano y largo plazo para promover la seguridad alimentaria y la reducción de los efectos del cambio climático sobre el medio ambiente en Costa Rica.
4. Debido a la naturaleza de estos estudios se debería de contemplar la colaboración con otros departamentos o bien centros de investigación del país, de manera tal que se puedan generar bases de datos más robustos que posteriormente puedan ser aplicados al ámbito agrícola.
5. Debido a que este tipo de modelaciones únicamente presenta la posible distribución espacial de los cultivos a futuro, es importante contemplar la implementación de otros programas informáticos o plataformas utilizadas en el ámbito agrícola entre los que se puede citar Casandra, la cual permite analizar espacialmente datos de crecimiento, desarrollo y rendimientos de cultivos obtenidos mediante el programa DSSAT, y así complementar los resultados de los escenarios de cambio climático propuestos.
6. Promover el diálogo nacional para la planificación temprana de labores de mitigación de cambio climático, donde se considere la competencia del uso del suelo a futuro y su potencial efecto sobre la soberanía alimentaria y la protección del medio ambiente, de manera que se abarque de una manera integral los diversos sectores del país.
7. Utilización de este tipo de herramientas para la toma de decisiones en caso de que haya un posible traslape entre zonas de cultivo a futuro y para visualizar de una mejor manera su potencial efecto sobre el sector socioeconómico del país.

## BIBLIOGRAFÍA

Adger WN, Dessai S, Goulden M, Hulme M, Lorenzoni I, Nelson DR, et al. Are there social limits to adaptation to climate change? *Clim Change*. 2009; 93 (3-4):335–54.

Arguedas D. Expansión agrícola y urbana devoran manglares del Pacífico. *Semanario Universidad* [Internet]. San José, Costa Rica; 2014 Jul; 2. Disponible en: <http://semanariouniversidad.ucr.cr/pais/expansin-agrcola-y-urbana-devoran-manglares-del-pacifico-2/>

Baldwin R. Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy*. 2009; 11 (4):854–66.

Benton J. Weather and Climatic Conditions. In: *Plant Nutrition and Soil Fertility Manual, Second Edition* [Internet]. CRC Press; 2012. p. 223–8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1201/b11577-34>

Betts RA, Golding N, Gonzalez P, Gornall J, Kahana R, Kay G, et al. Climate and land use change impacts on global terrestrial ecosystems and river flows in the HadGEM2-ES Earth system model using the representative concentration pathways. 2015;2000:1317–38.

Bongaarts J. Human population growth and the demographic transition. *Philos Trans R Soc B BiolSci* [Internet]. 2009 Sep 21;364(1532):2985 LP – 2990. Disponible en: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/364/1532/2985.abstract>

Bouroncle C, Imbach P, Läderach P, Rodríguez B, Medellín C, Fung E. La agricultura de Costa Rica y el cambio climático: ¿Dónde están las prioridades para la adaptación? *CGIAR Res Progr Clim Chang Agric Food Secur*. 2014; 8.

Bunn C, Läderach P, Pérez Jimenez JG, Montagnon C, Schilling T. Multiclass Classification of Agro-Ecological Zones for Arabica Coffee: An Improved Understanding of the Impacts of Climate Change. *PLoS One* [Internet]. Public Library of Science; 2015 Oct 27;10(10):e0140490. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0140490>

Camacho A. Un nudo de cooperación técnica sobre: los servicios ambientales en Costa Rica. San José, Costa Rica: IICA; 2010. 96 p.

Chowdhury RB, Moore GA. Floating agriculture: A potential cleaner production technique for climate change adaptation and sustainable community development in Bangladesh. *J Clean Prod* [Internet]. Elsevier Ltd; 2014; Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.060>

Collins M, Knutti R, Arblaste J, Dufresne J-L, Fichet T, Friedlingstein P, et al. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA; 2013.

Davis AP, Gole TW, Baena S, Moat J. The Impact of Climate Change on Indigenous Arabica Coffee (*Coffea arabica*): Predicting Future Trends and Identifying Priorities. 2012;7(11):10–4.

EPA. Climate Change in the United States: Benefits of Global Action. United States Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs. 2015; EPA-R-15-001.

Estes LD, Bradley BA, Beukes H, Hole DG, Lau M, Oppenheimer MG, et al. Comparing mechanistic and empirical model projections of crop suitability and productivity: implications for ecological forecasting. *Glob Ecol Biogeogr* [Internet]. 2013 Aug 1;22(8):1007–18. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1111/geb.12034>

Evangelista P, Young N, Burnett J. How will climate change spatially affect agriculture production in Ethiopia? Case studies of important cereal crops. 2013; 855–73.

FAO. Climate change and food security: risks and responses [Internet]. Roma; 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/82129a98-8338-45e5-a2cd-8eda4184550f/>

FAO. State of the world's forests 2016 [Internet]. Rome: FAO; 2016. 125 p. Disponible en: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/6547e46e-3e6f-4c47-8dcb-8c5c19a18e00/>

Fondo de Financiamiento Forestal de Costa Rica [FONAFIFO], Sistema Nacional de Áreas de Conservación [SINAC]. Mapa de tipos de bosque para Costa Rica [Internet]. 2012. Disponible en: [http://www.sirefor.go.cr/?page\\_id=872](http://www.sirefor.go.cr/?page_id=872)

Hidalgo HG, Alfaro EJ. Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America. *Int J Climatol*. 2015;35(12):3397–421.

Howden S, Soussana J, Tubiello F, Chhetri N, Dunlop M, Meinke H. Adapting agriculture to climate change. *Proc Natl Acad Sci [Internet]*. 2007 Dec 11;104(50):19691–6. Disponible en: <http://www.pnas.org/content/104/50/19691.full.pdf>

Instituto del Café de Costa Rica [ICAFFE]. Informe Sobre La Actividad Cafetalera De Costa Rica. Heredia, Costa Rica; 2015.

Instituto del Café de Costa Rica [ICAFFE]. Regiones Cafetaleras de Costa Rica [Internet]. 2016. Disponible en: <http://www.icafe.cr/nuestro-cafe/regiones-cafetaleras/>

Instituto Nacional de Estadísticas [INEC]. VI Censo Nacional Agropecuario [Internet]. San José, Costa Rica; 2015. Disponible en: <http://www.inec.go.cr>

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA]. Manual de recomendaciones del cultivo de arroz. San José, Costa Rica; 2008.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]. Modelos de simulación y herramientas de modelaje: elementos conceptuales y sistematización de herramientas para apoyar el análisis de impactos de la variabilidad y el cambio climático sobre las actividades agrícolas. San José, Costa Rica; 2015.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]. Impacto del cambio climático en la agricultura [Internet]. San José, Costa Rica; 2012. Disponible en: [http://www.iica.int/sites/default/files/document/2015-08/nota\\_tecnica\\_03-12.pdf](http://www.iica.int/sites/default/files/document/2015-08/nota_tecnica_03-12.pdf)



IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland; 2014. 151 p.

Jolliffe IT. Principal Component Analysis. 2nd ed. New York, NY: Springer-Verlag New York; 2002. 405 p.

Jones PG, Thornton PK. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change*. 2003; 13 (1):51–9.

Khanum R, Mumtaz a. S, Kumar S. Predicting impacts of climate change on medicinal asclepiads of Pakistan using Maxent modeling. *Acta Oecologica* [Internet]. Elsevier Masson SAS; 2013;49:23–31. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actao.2013.02.007>

Laderach P, Lundy M, Jarvis A, Ramirez J, Portilla EP, Schepp K, et al. Predicted Impact of Climate Change on Coffee Supply Chains. In: Leal Filho W, editor. *The Economic, Social and Political Elements of Climate Change* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2011. p. 703–23. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14776-0\\_42](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14776-0_42)

Loarie SR, Carter BE, Hayhoe K, McMahon S, Moe R, Charles A, et al. Climate Change and the Future of California's Endemic Flora. 2008;3(6).

Ministerio de Planificación Nacional y Planificación Económica [MIDEPLAN]. Índice de Desarrollo Social 2013. San José, Costa Rica; 2013.

Mitchell JFB, Lowe J, Wood R, Vellinga M. Extreme events due to human-induced climate change. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2006; 364 (1845):2117–33.

Molina S. Desarrollo verde e inclusivo en respuesta al cambio climático. *Ambientico* [Internet]. 2015;(258):24–9. Disponible en: <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/art/ambientico/A4.pdf>

Molina S, Pérez J, Herrera M. Assessment of environmental payments on indigenous territories: The case of Cabecar-Talamanca, Costa Rica. *Ecosyst Serv* [Internet]. 2014 Jun;

8: 35–43. Disponible en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041614000072>

Ovalle-Rivera O, Läderach P, Bunn C, Obersteiner M, Schroth G. Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. *PLoS One* [Internet]. 2015;10(4):e0124155. Disponible en:  
<http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0124155>

Peters G, Samper M. *Café de Costa Rica: un viaje a lo largo de su historia*. Instituto del Café de Costa Rica; 2001. 196 p.

Phillips S, Dudík M, Schapire R. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proc Twenty-First Int Conf Mach Learn* [Internet]. 2004; 655–62. Disponible en:  
<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1015412>

Porter JR, Semenov MA. Crop responses to climatic variation. *Philos Trans R Soc B: Biol Sci* [Internet]. 2005. Nov 29; 360 (1463): 2021–35. Disponible en:  
<http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/360/1463/2021.abstract>

Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano. *Armonía con la naturaleza. Vigésimo primer Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José, Costa Rica; 2015.

Rodríguez G, Valverde M. *Informe de Gestión del Sector Agropecuario y el Desarrollo de los Territorios Rurales*. San José, Costa Rica; 2016.

Rosenzweig C. *Climate Change and Agriculture*. In: Meyers AR, editor. *Extreme Environmental Events: Complexity in Forecasting and Early Warning* [Internet]. New York, NY: Springer New York; 2011. p. 31–41. Disponible en:  
[http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6\\_3](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_3)

Sancho F. *Generación y evaluación de un sistema de información geográfica para mapear áreas de plantas cultivas, sus parientes silvestres y el posible flujo de genes entre ambas: el caso de Arroz en Costa Rica*. San José, Costa Rica; 2012

Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuario [SEPSA]. *Boletín Estadístico Agropecuario N°25*. San José, Costa Rica; 2015.

Secretaría Ejectiva de Planificación Sectorial Agropecuario [SEPSA]. Boletín Estadístico Agropecuario N°26. San José, Costa Rica; 2016.

Smith, P., y Olesen JE. Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture. *J Agric Sci* [Internet]. 2010; 148 (5): 543–52. Disponible en: <http://dx.doi.org.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr:2048/10.1017/S0021859610000341>

Streck NA. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature on crop growth, development, and yield. *Ciência Rural*. 2005; 35 (3): 730–40.

Tanaka K, Kiura T. An Elucidation System for the Climatic Change Effect on Agriculture in the Asian Monsoon Region. 2015;1–7.

Tubielo F., Salvatore M, Córdor Golec R., Ferrara A, Rossi S, Biancalani R, et al. Agriculture , Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks 1990-2011 Analysis. Rome, Italia; 2014.

Vallejo C. El desarrollo de la acción climática: una propuesta ante los INDCs para Costa Rica. *Ambientico* [Internet]. 2016;(258):70–5. Disponible en: <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/art/ambientico/A11.pdf>

Van der Linden S, Leiserowitz A, Feinberg G, Maibach E. How to communicate the scientific consensus on climate change: plain facts, pie charts or metaphors? *Climate Change*. 2014; 126 (1-2): 255–62.

Van Gils H, Westinga E, Carafa M, Antonucci A, Ciaschetti G. Where the bears roam in Majella National Park, Italia. *J Nat Conserv* [Internet]. Elsevier GmbH.; 2014;22(1):23–34. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnc.2013.08.001>

Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, et al. The representative concentration pathways: Another view. *Climate Change*. 2011; 109(1) :5–31.

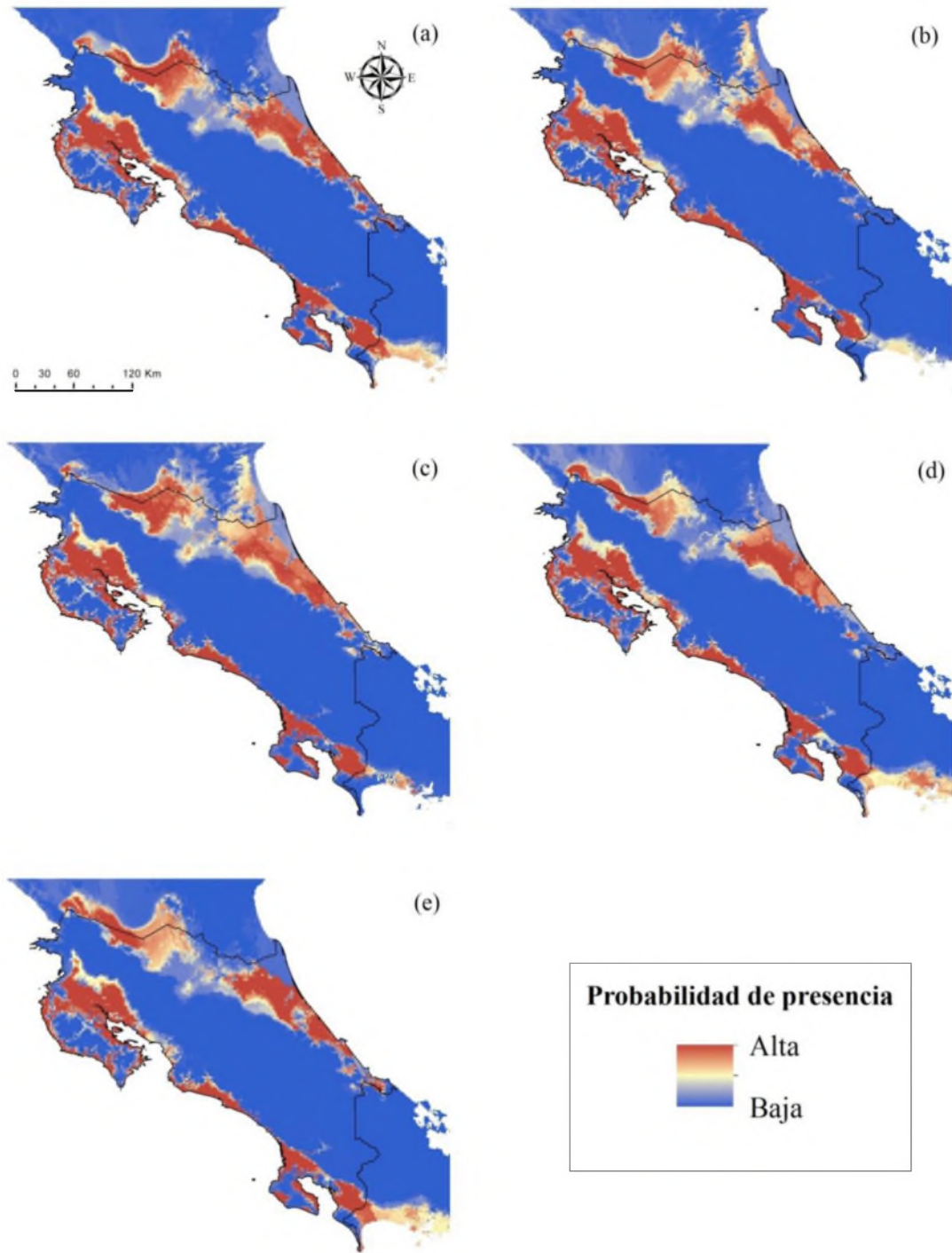
Villalobos R, Retana J. Efecto del Cambio Climático en la Agricultura. Experiencias en Costa Rica. Gestión Desarrollo Instituto Meteorológico Nacional. 1999

Wollni M, Zeller M. Do farmers benefit from participating in specialty markets and cooperatives? The case of coffee marketing in Costa Rica. *Agric Econ* [Internet]. Blackwell Publishing Inc; 2007 Sep 1;37(2-3):243–8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-0862.2007.00270.x>

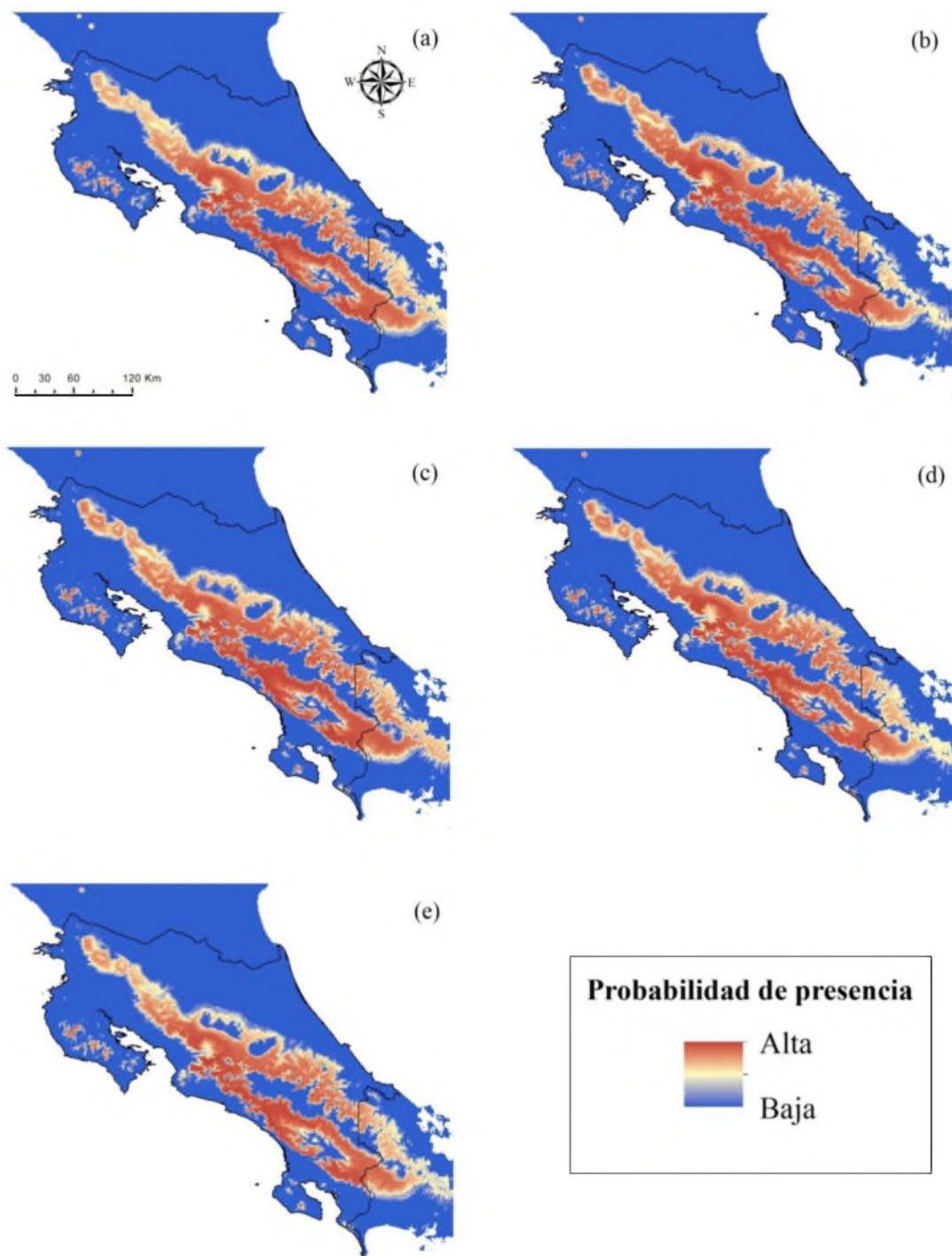
Wreford A, Moran D, Adger N. *Climate Change and Agriculture: Impacts, Adaptation and Mitigation*. Source OECD Agriculture & Food, Volume 9. 2010. i-139 p.

Ye Q, Yang X, Dai S, Chen G, Li Y, Zhang C. Effects of climate change on suitable rice cropping areas, cropping systems and crop water requirements in southern China. *AgricWater Manag* [Internet]. Elsevier B.V.; 2015; 159: 35–44. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037837741530013>

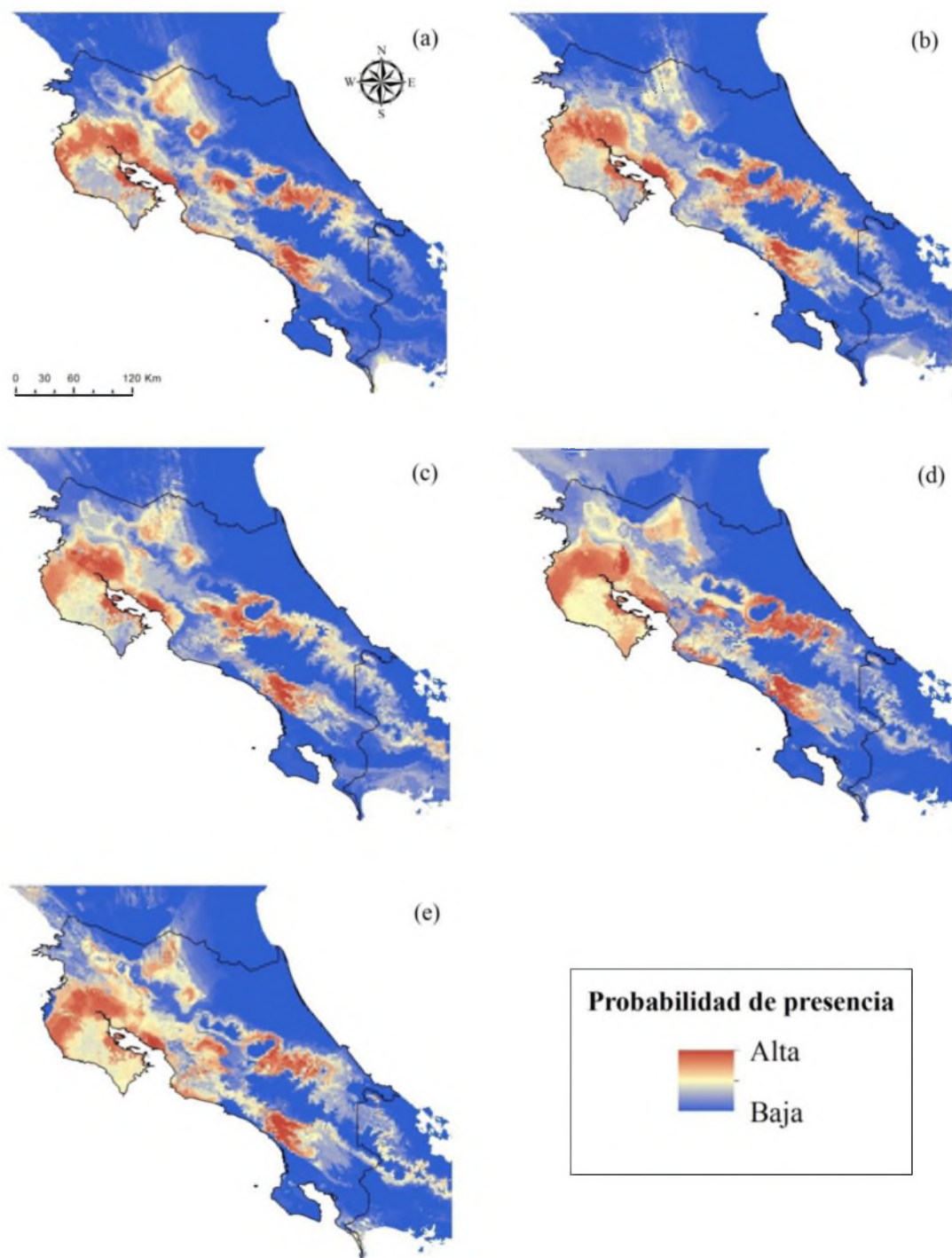
## ANEXOS



Anexo 1. Rasters de probabilidad de la distribución del cultivo de arroz para los escenarios: (a) Actual, (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0

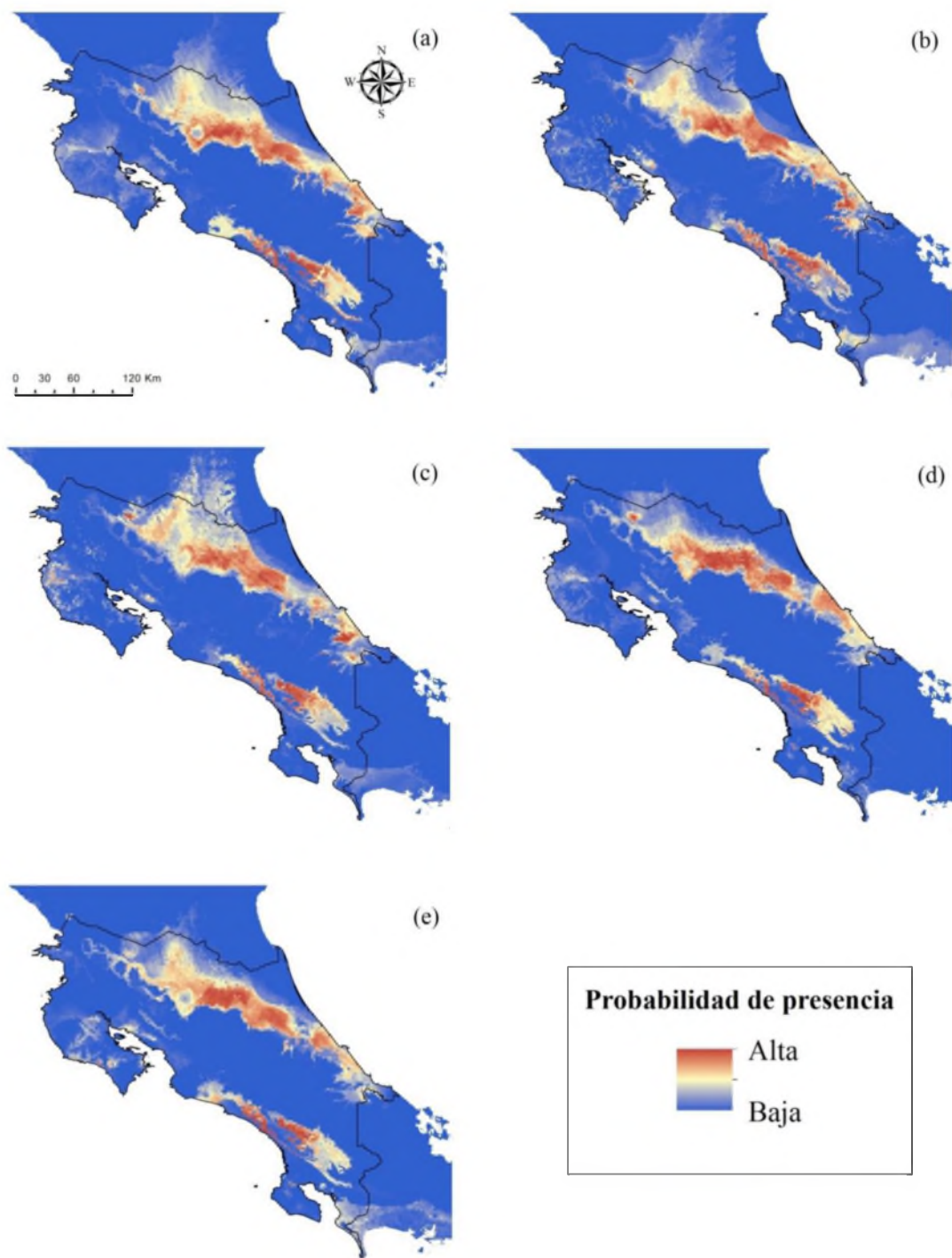


Anexo 2. Rasters de probabilidad de la distribución del cultivo de café para los escenarios:  
 (a) Actual, (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0



Anexo 3. Rasters de probabilidad de la distribución del cultivo de caña de azúcar para los escenarios: (a) Actual, (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0





Anexo 4. Rasters de probabilidad de la distribución del cultivo de piña para los escenarios:  
 (a) Actual, (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0



Anexo 5. Análisis estadístico para determinar diferencias entre los modelos para el cultivo de arroz.

Cultivo	Provincias	Número de pixeles de presencia por modelo bioclimático				p-value
		Miroc 4.5	Miroc 6.0	Hadgem 4.5	Hadgem 6.0	
Arroz	San José	53	49	50	49	0,98
	Puntarenas	<b>3118</b>	3314	<b>3603</b>	3459	< 0.05
	Limón	2027	<b>1985</b>	2790	<b>2880</b>	< 0.05
	Heredia	775	<b>512</b>	<b>874</b>	727	< 0.05
	Guanacaste	3675	3515	3589	3541	0,25
	Cartago	1	1	1	0	0,80
	Alajuela	1538	<b>1805</b>	1398	<b>832</b>	< 0.05

Anexo 6. Análisis estadístico para determinar diferencias entre los modelos para el cultivo de café.

Cultivo	Provincia	Número de pixeles de presencia por modelo bioclimático				p-value
		Miroc 4.5	Miroc 6.0	Hadgem 4.5	Hadgem 6.0	
Café	San José	3485	3426	3422	3483	0,79
	Puntarenas	<b>3098</b>	3333	<b>3145</b>	3166	0,02
	Limón	<b>970</b>	1341	<b>1400</b>	1394	< 0.05
	Heredia	219	193	239	203	0,13
	Guanacaste	1161	<b>1230</b>	1175	<b>987</b>	< 0.05
	Cartago	<b>1505</b>	1626	1753	<b>1755</b>	< 0.05
	Alajuela	<b>2147</b>	1922	2016	<b>1681</b>	< 0.05

Anexo 7. Análisis estadístico para determinar diferencias entre los modelos para el cultivo de caña de azúcar.

Cultivo	Provincia	Número de pixeles de presencia por modelo bioclimático				p-value
		Miroc 4.5	Miroc 6.0	Hadgem 4.5	Hadgem 6.0	
<b>Caña</b>	San José	<b>2899</b>	<b>2302</b>	2547	2635	< 0.05
	Puntarenas	2700	<b>2533</b>	3954	<b>4251</b>	< 0.05
	Limón	<b>1078</b>	913	<b>874</b>	953	< 0.05
	Heredia	235	230	<b>273</b>	<b>192</b>	< 0.05
	Guanacaste	<b>5801</b>	7241	<b>8578</b>	8326	< 0.05
	Cartago	<b>1622</b>	1666	<b>1798</b>	1694	< 0.05
	Alajuela	<b>2144</b>	2678	3454	<b>3642</b>	< 0.05

Anexo 8. Análisis estadístico para determinar diferencias entre los modelos para el cultivo de piña.

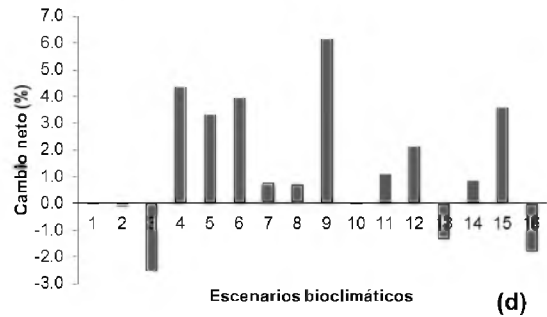
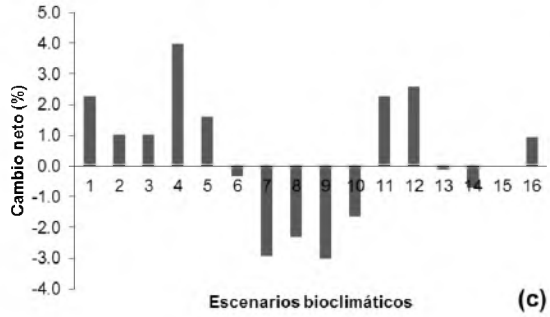
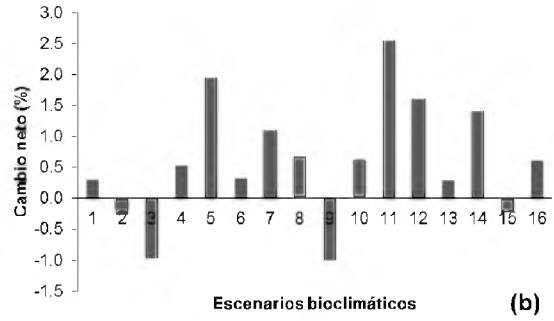
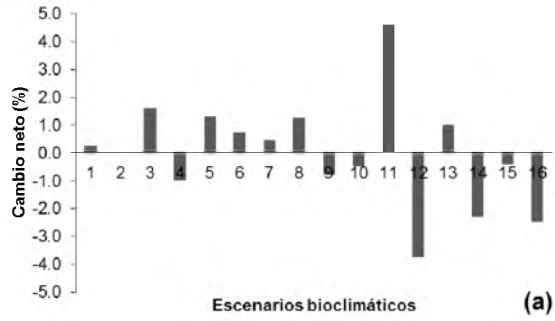
Cultivo	Provincia	Número de pixeles de presencia por modelo bioclimático				p-value
		Miroc 4.5	Miroc 6.0	Hadgem 4.5	Hadgem 6.0	
<b>Piña</b>	San José	591	539	502	551	0,06
	Puntarenas	<b>1096</b>	1134	<b>1513</b>	1216	< 0.05
	Limón	2140	<b>1970</b>	<b>2186</b>	2136	0,01
	Heredia	<b>1098</b>	<b>1251</b>	1158	1129	0,01
	Guanacaste	53	<b>113</b>	<b>18</b>	79	< 0.05
	Cartago	31	<b>39</b>	7	24	< 0.05
	Alajuela	<b>1596</b>	2637	2315	<b>2784</b>	< 0.05

Anexo 9. Análisis estadístico para determinar diferencias entre la condición actual y los escenarios futuros para la distribución de cultivos a nivel cantonal municipal.

<b>Cultivo</b>	<b>Escenarios Futuros</b>	<b>p - value</b>
<b>Arroz</b>	Miroc 4.5	0.769
	Miroc 6.0	0.712
	Hadgem 4.5	0.498
	Hadgem 6.0	0.061
<b>Café</b>	Miroc 4.5	0.847
	Miroc 6.0	0.297
	Hadgem 4.5	0.170
	Hadgem 6.0	0.403
<b>Caña de azúcar</b>	Miroc 4.5	0.354
	Miroc 6.0	0.327
	Hadgem 4.5	< 0.05
	Hadgem 6.0	< 0.05
<b>Piña</b>	Miroc 4.5	0.607
	Miroc 6.0	< 0.05
	Hadgem 4.5	0.102
	Hadgem 6.0	< 0.05

Anexo 10. Variaciones porcentuales en las variables de temperatura y precipitación utilizadas para elaborar los 16 nuevos escenarios.

<b>Escenario</b>	<b>Temperatura promedio anual</b>	<b>Precipitación anual</b>
1	5	5
2	10	5
3	-5	5
4	-10	5
5	5	10
6	10	10
7	-5	10
8	-10	10
9	5	-5
10	10	-5
11	-5	-5
12	-10	-5
13	5	-10
14	10	-10
15	-5	-10
16	-10	-10



Anexo 11. Cambio neto de las áreas para los cultivos de (a) arroz, (b) café, (c) caña de azúcar y (d) piña de los escenarios con variaciones porcentuales de las variables de temperatura promedio anual y precipitación anual.

Anexo 12. Porcentaje del área total del territorio nacional que abarcan los cultivos de arroz, café, caña de azúcar y piña según escenarios de cambio climático estudiados.

<b>Cultivo</b>	<b>Porcentaje de área del territorio nacional (%)</b>			
	<b>Miroc 4.5</b>	<b>Miroc 6.0</b>	<b>Hadgem 4.5</b>	<b>Hadgem6.0</b>
Arroz	18.93	18.92	20.82	19.44
Café	21.30	22.12	22.25	21.44
Caña de Azúcar	27.89	29.72	36.35	36.71
Piña	11.18	13.00	13.03	13.40