

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

Potential Distribution of Three Agricultural Crops in Costa Rica Under Scenarios of Climate Change: Implications of Agroforestry Management and Socio-Economical Development

Alberto Coto Fonseca
Universidad de Costa Rica
alberto.cotof@gmail.com

Carlos Rojas
Universidad de Costa Rica
rojas_carlos@outlook.com

Sergio A. Molina-Murillo
Universidad Nacional de Costa Rica, Universidad de Costa Rica
sergiomolina@una.cr

Recibido: 3 de octubre 2016

Aceptado: 26 de junio 2017

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 debido al cambio de distribución de zonas aptas corresponden a ambientes rurales. Las variaciones puntuales en las variables de temperatura media anual y la precipitación anual no presentaron un patrón definido en las áreas de distribución de los cultivos. Respecto al efecto del traslape entre las zonas de producción y la zona boscosa del país, para el cultivo de caña de azúcar, todos los escenarios futuros presentan un mayor traslape, mientras que el cultivo de piña muestra una tendencia inversa. Por ello, 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 clave

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 due to the change in distribution of suitable areas correspond to rural environments. The point variations in mean annual temperature and annual precipitation variables did not show a defined pattern in the distribution areas of the crops. Regarding the overlapping effect between production areas and the forest area of the country, sugarcane presents the greatest overlapping in all future scenarios, while pineapple cultivation shows an inverse trend. 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

Ecologic modeling, maxent, pineapple, rice, sugarcane.

1. 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 (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. Si bien en las últimas décadas se han implementado modernas técnicas de producción que minimizan los efectos sobre el ambiente (3), 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 (4). 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 (5), 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 (6) que permitan la elaboración de planes climáticos de adaptación. Si lo anterior se integra con una estrategia de comunicación sobre cambio climático (7) se podría más efectivamente lograr la implementación de acciones climáticas (8), y generar una estrategia de desarrollo aplicable en el contexto rural en el que ocurre la agricultura (9).

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 cuatro escenarios de cambio climático: Miroc 4.5, Miroc 6.0, Hadgem 4.5 y Hadgem 6.0. 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.

2. 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). En dicho mapa se presenta la distribución “actual” 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 (10).

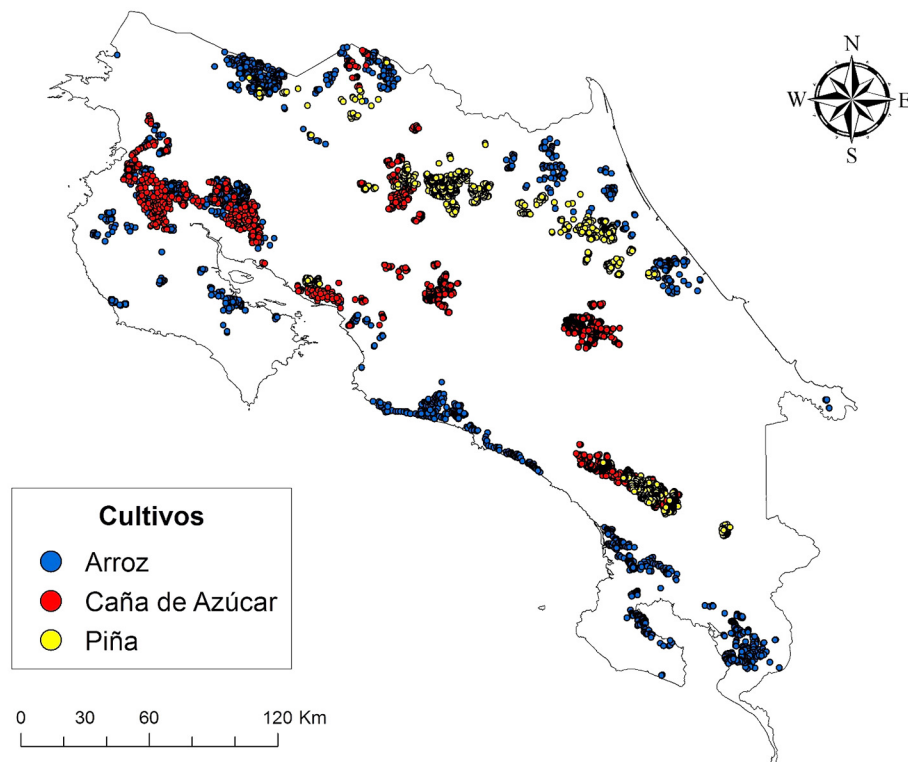


Figura 1. Distribución actual de los tres cultivos estudiados en el presente proyecto.

Para el cultivo de arroz se localizaron 1476 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”. 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 un total de 1537 puntos. Finalmente, para el cultivo de piña se localizaron 1100 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 segundos (aproximadamente 1 km²) 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. Los dos primeros se obtuvieron de WorldClim (www.worldclim.org). En el último caso los datos se obtuvieron del repositorio climático del Programa de investigación en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR, www.cgiar.org). Además de los dos MCG, se seleccionaron las sendas representativas de concentración (RCP) denominadas 4.5 y 6.0 debido a su aplicabilidad real en el campo agrícola (11). De esta forma, para esta investigación se evaluaron cuatro modelos de proyección diferentes 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 (12).

Para evitar una alta correlación entre las variables, se analizaron las correlaciones lineales (r de Pearson) para todas las combinaciones 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 1. 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. Para lo anterior, se llevaron a cabo pruebas de bondad de ajuste de Chi-cuadrado para tablas de contingencia utilizando como parámetro de análisis el valor correspondiente a la probabilidad de presencia del cultivo en el cantón, con el fin de 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 (13).

3. 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 (Tabla 1).

Tabla 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 diurno	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 (14), 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 (Tabla 2). De esta forma, los cuatro modelos se consideraron equivalentes en su proyección futura, a pesar de las diferencias intrínsecas entre ellos.

Tabla 2. Cantidad de píxeles 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 píxeles			
	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

Las figuras 2, 3 y 4 muestran el resultado espacial proyectado de ganancia y pérdida asociada a la probabilidad de existencia de los cultivos para los cuatro escenarios estudiados.

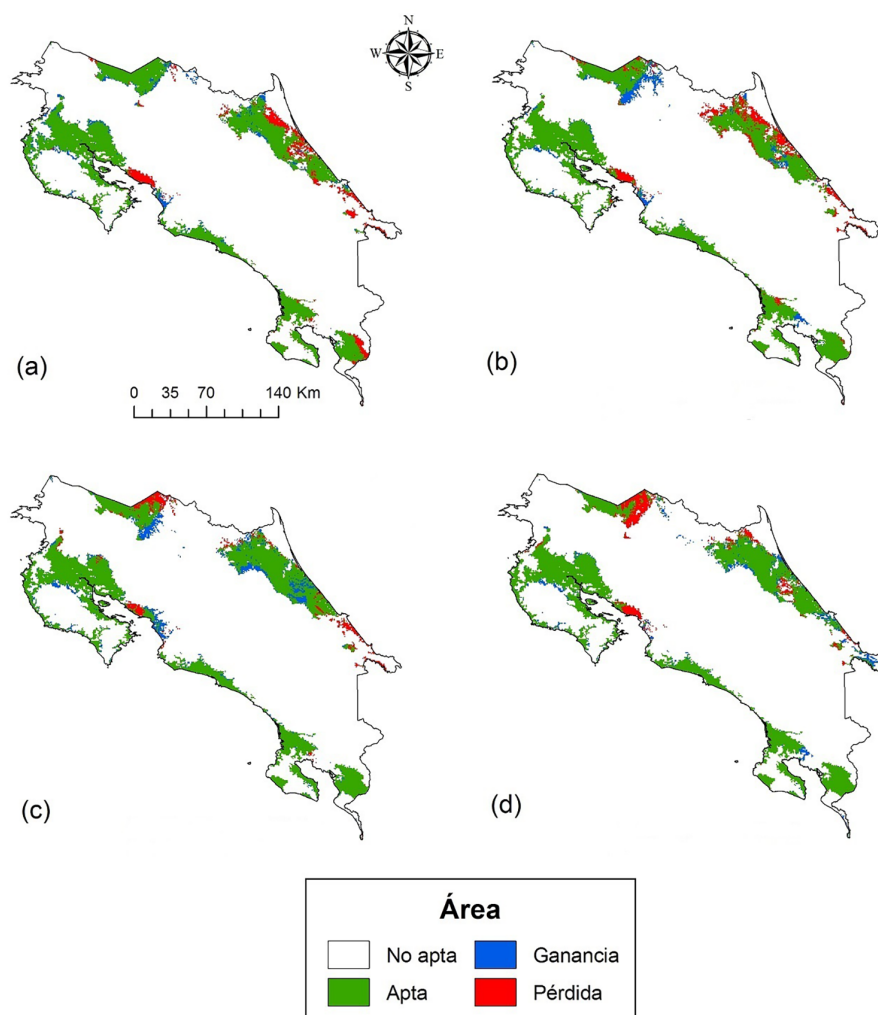


Figura 2. Áreas de ganancia o pérdida proyectadas al año 2070 con alta probabilidad bioclimática de cambio asociado para el cultivo del arroz en los cuatro escenarios de cambio climático estudiados: (a) Miroc 4.5, (b) Miroc 6.0, (c) Hadgem 4.5 y (d) Hadgem 6.0.

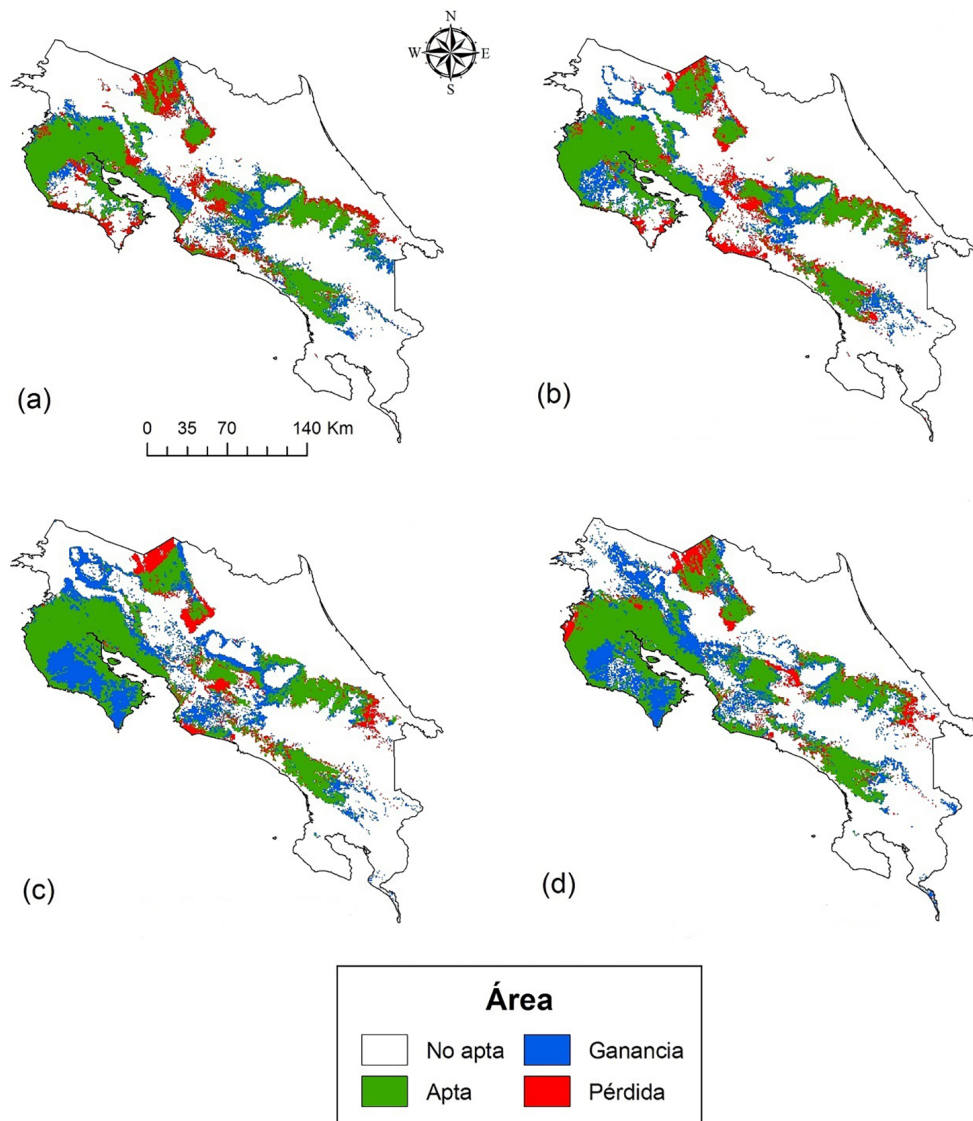


Figura 3. Áreas de ganancia o pérdida proyectadas al año 2070 con alta probabilidad bioclimática de cambio asociado para el cultivo de caña de azúcar en los cuatro escenarios de cambio climático estudiados: (a) Miroc 4.5, (b) Miroc 6.0, (c) Hadgem 4.5 y (d) Hadgem 6.0.

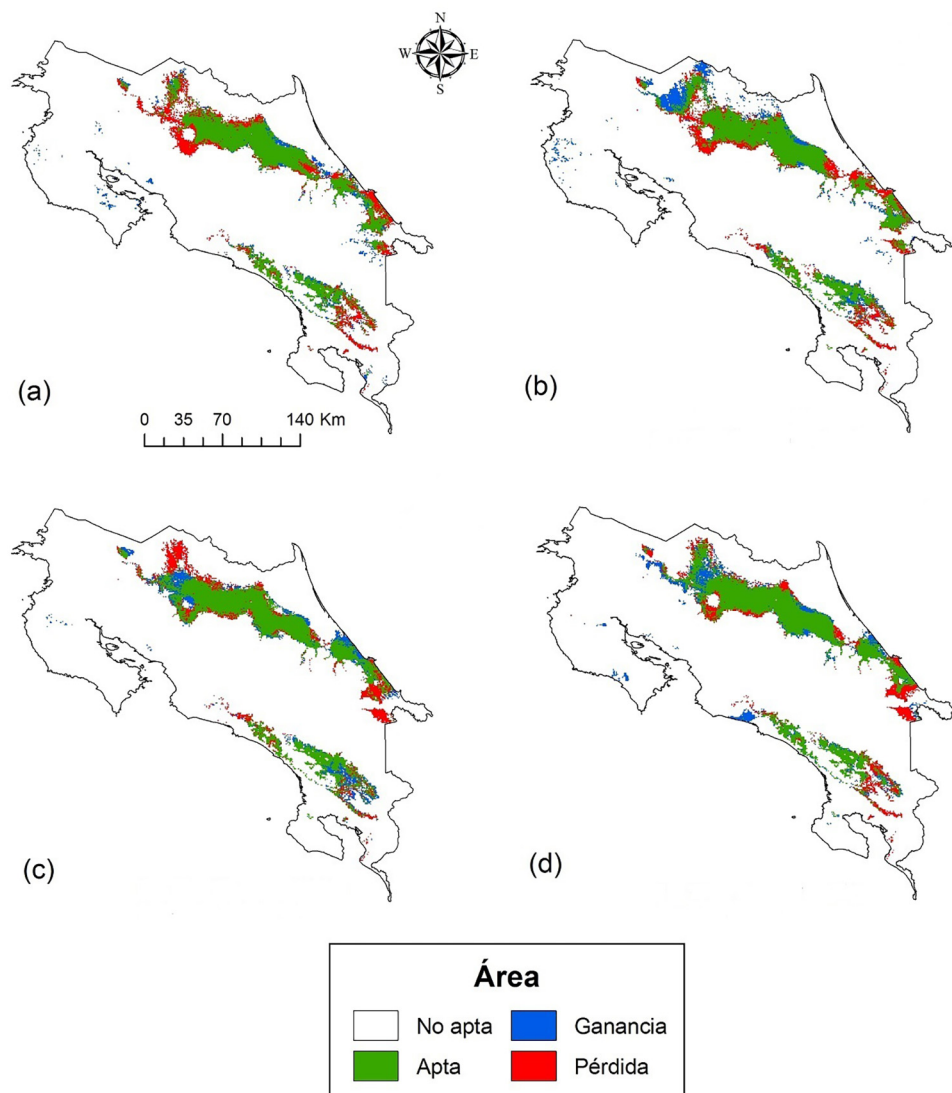


Figura 4. Áreas de ganancia o pérdida proyectadas al año 2070 con alta probabilidad bioclimática de cambio asociado para el cultivo de piña en los cuatro escenarios de cambio climático estudiados: (a) Miroc 4.5, (b) Miroc 6.0, (c) Hadgem 4.5 y (d) Hadgem 6.0.

En la Fig. 5 se observa que el mayor potencial de pérdida espacial asociado con parámetros bioclimáticos 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.

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 a nivel provincial. 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.

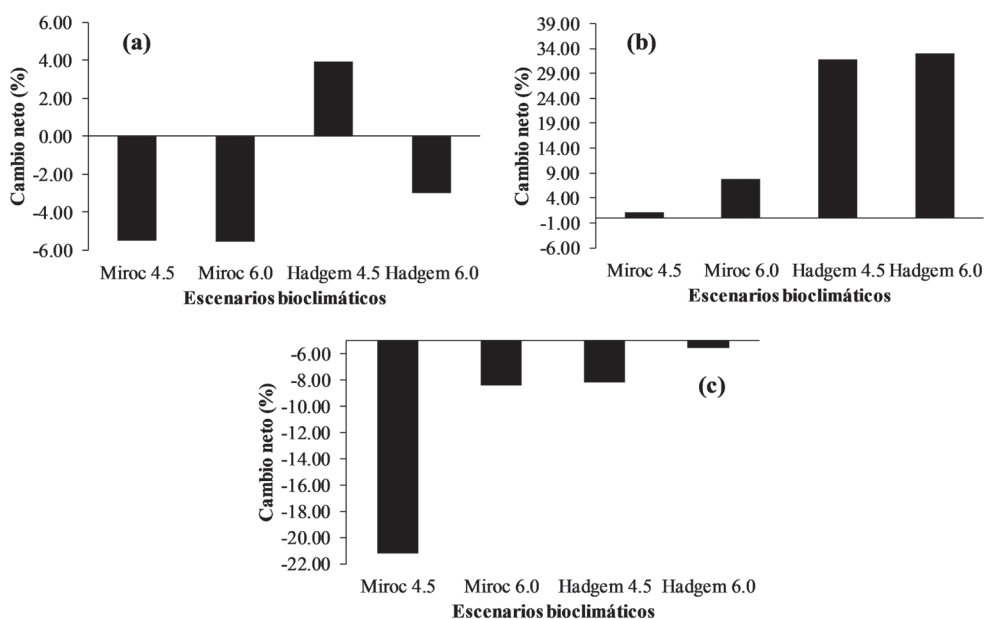


Figura 5. Cambio neto de posibles áreas aptas para el cultivo de (a) arroz, (b) caña de azúcar y (c) piña para los escenarios futuros evaluados en este estudio.

Para la probabilidad de presencia del cultivo de arroz por cantón, los resultados indican 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 de los cultivos y aumentó la cantidad de cantones con probabilidad baja.

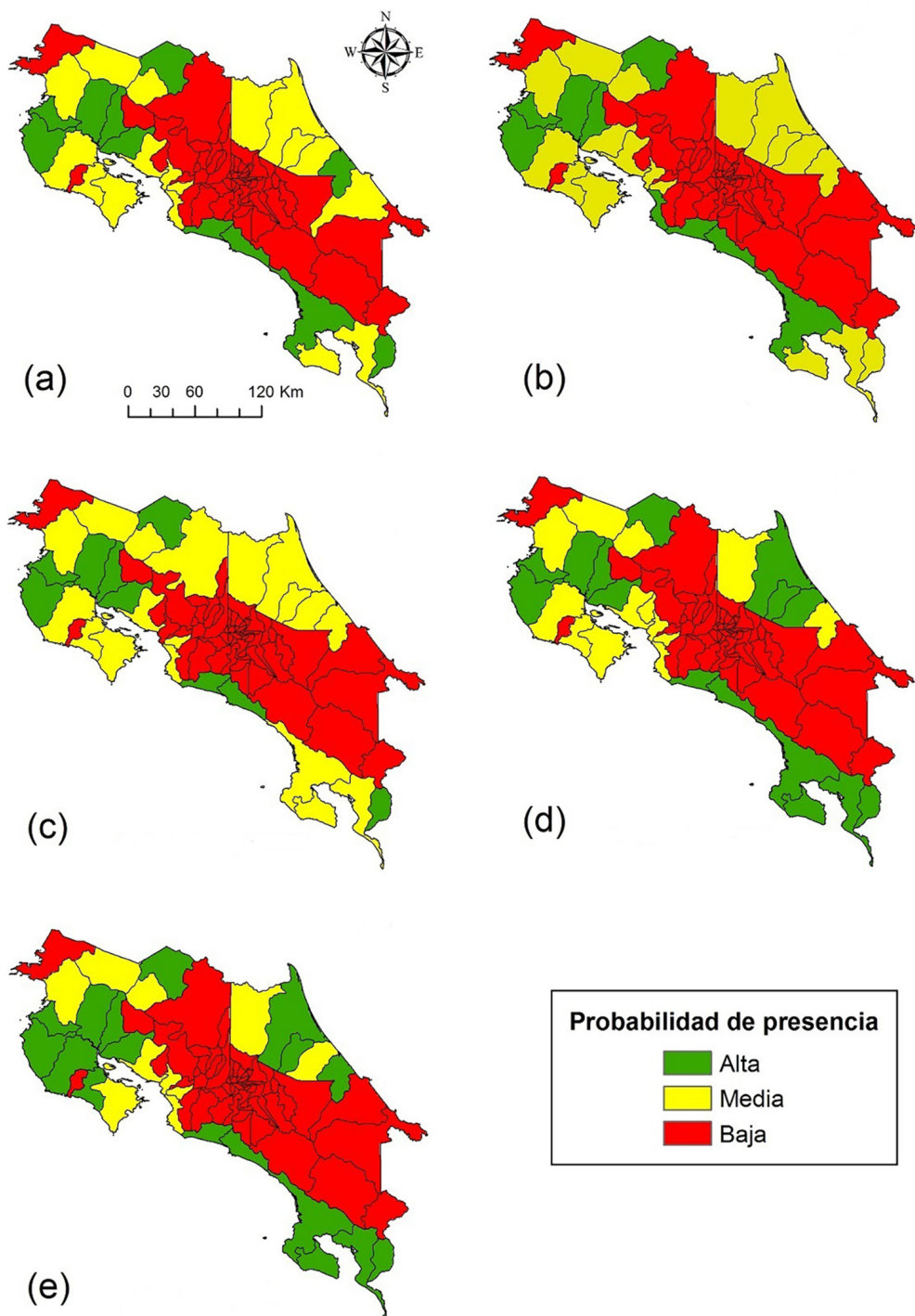


Figura 6. Probabilidad de presencia del arroz por cantón para (a) la condición actual y los cuatro escenarios evaluados: (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0.

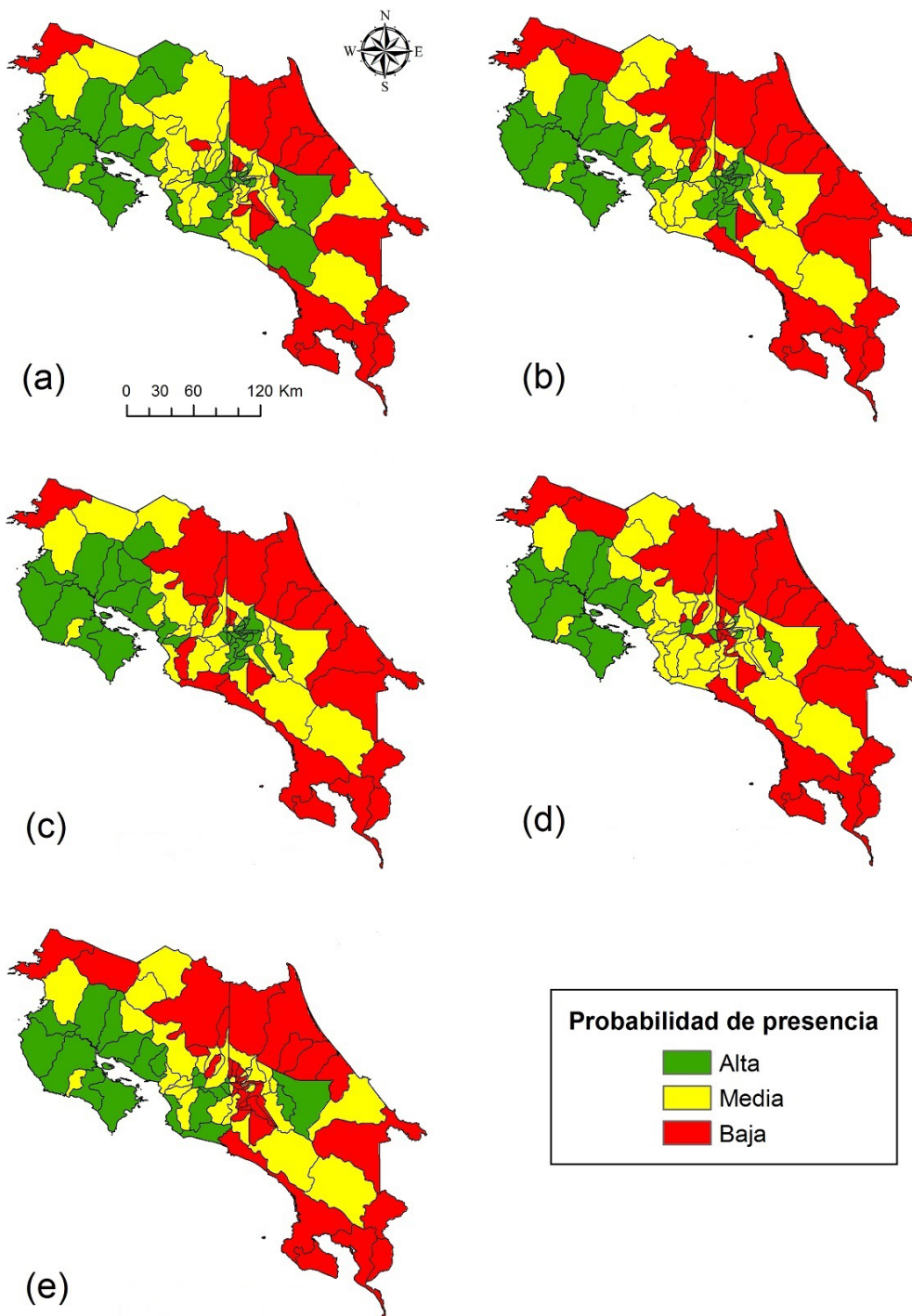


Figura 7. Probabilidad de presencia de caña de azúcar por cantón para (a) la condición actual y los cuatro escenarios evaluados: (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0.

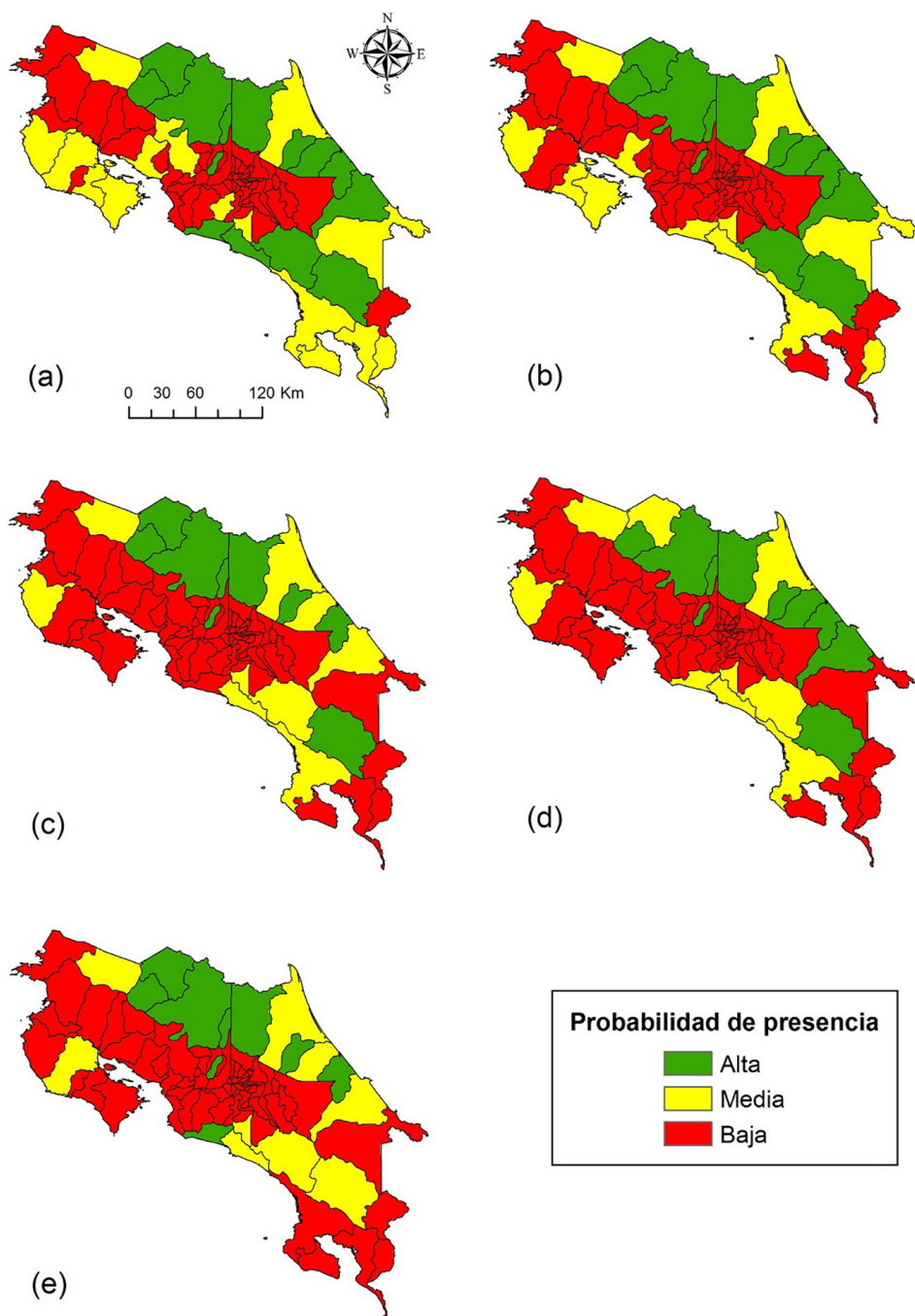


Figura 8. Probabilidad de presencia de piña por cantón para (a) la condición actual y los cuatro escenarios evaluados: (b) Miroc 4.5, (c) Miroc 6.0, (d) Hadgem 4.5 y (e) Hadgem 6.0.

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 señalan un mayor traslape. En el caso de caña de azúcar, todos los modelos muestran 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.

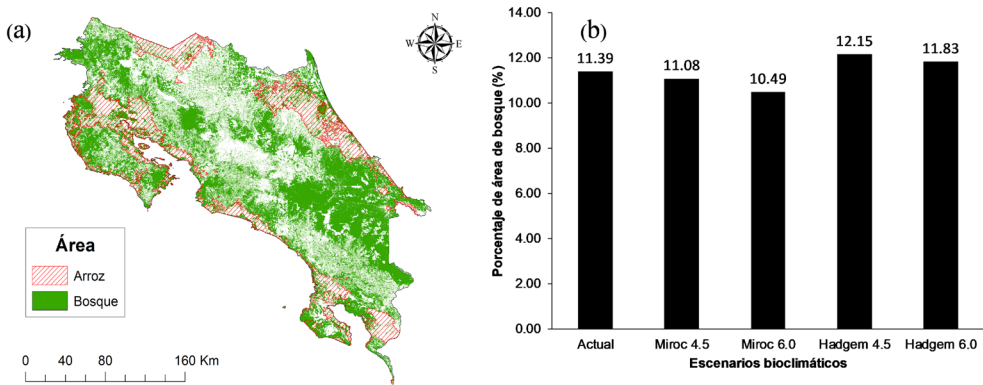


Figura 9. Traslape de cultivo de arroz y cobertura boscosa del país para: (a) condición actual y (b) escenarios futuros de cambio climático evaluados en la presente investigación.

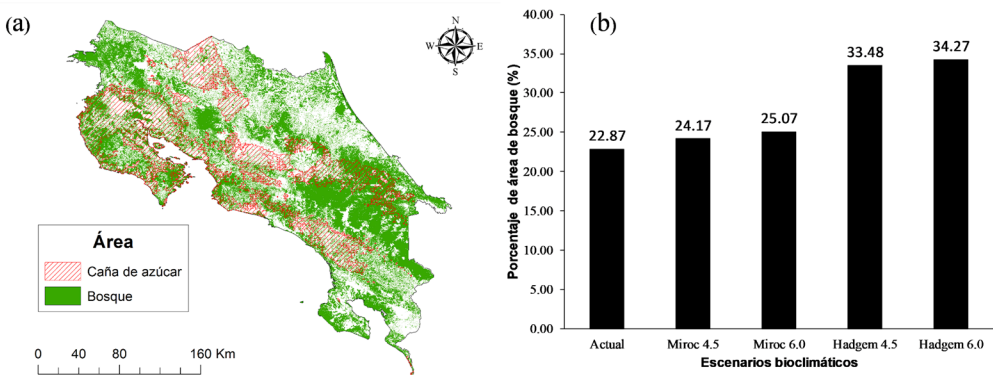


Figura 10. Traslape de cultivo de caña de azúcar y cobertura boscosa del país para: (a) condición actual y (b) escenarios futuros de cambio climático evaluados en la presente investigación.

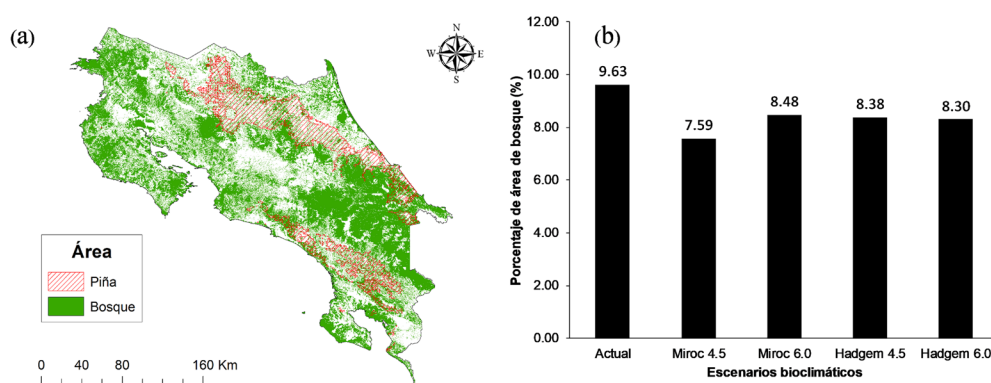


Figura 11. Traslape de cultivo de piña y cobertura boscosa del país para: (a) condición actual y (b) escenarios futuros de cambio climático evaluados en la presente investigación.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a través de los modelos evaluados en este trabajo tienen que verse como insumos para el análisis integrado en el complejo 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, y que el modelaje es únicamente una herramienta parsimoniosa e importante de análisis contextual. En este sentido, es necesario analizar los resultados obtenidos con cautela.

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 (15)), 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 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 indican 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) como los parámetros que en realidad podrían ser útiles en este tipo de modelaje sobre la distribución geográfica de cultivos.

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 (16), 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. El cultivo de piña fue el único que mostró un cambio neto negativo de área apta en todos los escenarios; la 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, debido a lo impredecible que se han vuelto los patrones de lluvias, la posible reducción del recurso hídrico necesario para la presencia de la piña en estas zonas también conlleva un riesgo asociado, 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%) (16), no mostraron patrones negativos de efecto en los modelos, lo cual indica que la reducción del área apta para la producción de este cultivo se encuentra focalizada, especialmente en las zonas de Siquirres y Pérez Zeledón.

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 (17). Lo anterior muchas veces crea un panorama en el que estas zonas carecen de las herramientas suficientes para adaptarse a los cambios de clima (18) y por ello optan por producir cultivos menos adecuados, de bajo rendimiento o precios fluctuantes y en muchos casos abandonan la actividad agrícola, con consecuencias socioeconómicas negativas.

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 siquiera 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 (19). Sin embargo, considerando los efectos negativos de la deforestación y el potencial del sector agrícola de trasladarse, por razones bioclimáticas, con estos bosques, es relevante analizar el posible efecto de la expansión o reducción del área apta para los cultivos agrícolas sobre la cobertura boscosa del país, ya que es claro que esta relación entre el agro y el manejo forestal es un punto de gran relevancia que 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 (20) 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.

Finalmente, este tipo de estudios son de gran importancia, ya que no solo permiten determinar la posible expansión o reducción de diversas zonas de producción agrícola del país, sino también, una visión más amplia de cómo estos cambios pueden afectar otros sectores de gran importancia para Costa Rica, como lo es el sector forestal. Modelajes similares pueden ser utilizados para implementar estrategias de manejo y adaptación para el actual y futuro uso del suelo en Costa Rica.

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
3. 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>
4. 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
5. 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://rspb.royalsocietypublishing.org/content/364/1532/2985.abstract>
6. 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.
7. 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.
8. 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>
9. Molina-Murillo S.A. 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>
10. Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuario. *Boletín Estadístico Agropecuario*. San José, Costa Rica; 2015.
11. 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.

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

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

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

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

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

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

18. 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.

19. 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.

20. 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-agrocola-y-urbana-devoran-manglares-del-pacifico-2/>