

**ZONAS IDÓNEAS PARA LOS CULTIVOS DE BRÓCOLI Y ARVEJA DULCE EN
EL ALTIPLANO DE GUATEMALA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO
CLIMÁTICO**

Jesús Antonio Pantoja Cueltán



CIAT
Centro Internacional de Agricultura Tropical
International Centre for Tropical Agriculture
Conservation Group in International Agricultural Research

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Ingeniería Topográfica
Santiago de Cali
2012

**ZONAS IDÓNEAS PARA LOS CULTIVOS DE BRÓCOLI Y ARVEJA DULCE EN
EL ALTIPLANO DE GUATEMALA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO
CLIMÁTICO**

Jesús Antonio Pantoja Cueltán

Trabajo de Grado en modalidad de Tesis para optar al título a
Ingeniero Topográfico

**Director Académico
Mónica Preciado Vargas
Universidad del Valle**

**Director Institucional
Peter Läderach
Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT**



**Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Ingeniería Topográfica
Santiago de Cali
2012**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma Director de Tesis

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, 14 de marzo de 2012

AGRADECIMIENTOS

El Autor expresa sus agradecimientos a:

A mis padres por el apoyo brindado desde siempre.

A mi hermana por su compañía.

A Mónica Preciado Vargas por su valioso apoyo en la dirección de este proyecto.

A Audberto Quiroga por sus aportes en momentos de confusión

A Lorena Gómez Centeno por el conocimiento brindado y sobre todo por su compañía en todo momento.

A Peter Läderach por haberme brindado la oportunidad de desarrollar este proyecto, y por su apoyo constante.

A Emmanuel Zapata Caldas por la revisión del documento, por sus aportes en redacción científica, y sobre todo por el apoyo brindado durante todo el proceso.

A Anton Eitzinger por el conocimiento brindado y sus aportes metodológicos.

A todas aquellas personas que creyeron en este proyecto, mil gracias.

CONTENIDO

CONTENIDO	5
Lista de tablas	7
Lista de figuras	8
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
JUSTIFICACIÓN	14
1. OBJETIVOS	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2. MARCO REFERENCIAL	17
1.3 Marco conceptual	17
1.3.1 Cambio climático	17
1.3.2 Modelos predictivos	18
1.3.3 Adaptación al cambio climático	18
1.3.4 Aptitud climática (AC) de cultivos, predicción EcoCrop	19
1.3.5 Desarrollo sustentable	19
1.3.6 Conocimiento local y científico	20
1.3.7 El análisis o Evaluación Multicriterio (EMC)	20
1.3.8 Método AHP (Analytic Hierarchy Process), o PAJ (Proceso de Análisis Jerárquico)	21
3. METODOLOGÍA	24

1.4	Zona de Estudio.....	24
1.4.1	Tierras Altas de Guatemala.....	24
1.5	Metodología del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) PARA LA modelación de cultivos con modelos climáticos	26
1.5.1	Modelos de clima actual.....	27
1.5.2	Generación del clima del futuro.....	27
1.5.3	Modelación de aptitud climática de cultivos	29
1.6	Desarrollo del modelo de restricciones espaciales e integración con las modelaciones del CIAT.....	34
1.6.1	Determinación de variables espaciales	35
1.6.2	Ponderación de variables espaciales	39
1.6.3	Cruce de restricciones espaciales e información de AC.	47
4.	RESULTADOS	50
1.7	Clima actual de la zona, y proyección hacia el futuro (2050).....	50
1.8	Restricciones espaciales en la actualidad	51
1.8.1	Comparación de áreas protegidas y zonas cultivadas	51
1.8.2	Comparación entre cultivos perennes y cultivos de corto ciclo	52
1.8.3	Distribución de los bosques en la zona de estudio.....	53
1.8.4	Accesibilidad	54
1.8.5	Topografía.....	56
1.8.6	Ponderación de todas las variables.....	58
1.9	Disponibilidad según restricciones espaciales y AC	61
1.9.1	Cuantificación del porcentaje de la AC en el año 2050 de las zonas que en la actualidad tienen AC mayor al 40%.....	61

1.9.2 Cuantificación del área de las zonas que tendrían AC mayor al 40% ahora y en el 2050.....	65
1.9.3 Zonas con AC mayor a 40% en la actualidad Vs. zonas que podrían presentar buena AC en el 2050.....	68
1.9.4 Zonas que tendrían buena aptitud en el futuro, sin importar su localización en la actualidad.....	75
1.10 Validación de los resultados.....	78
5. CONCLUSIONES.....	81
6. RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA	83

Lista de tablas

Tabla 1 Valores sugeridos por Saaty para representar la importancia de las variables	21
Tabla 2: valores de Índice Aleatorio (IA) según el número de variables (n).....	22
Tabla 3: Área de bosque de los encuestados	37
Tabla 4: Tipo de topografía registrada en las encuestas	38
Tabla 5: Valores usados para representar la importancia de las variables.....	40
Tabla 6: Matriz de la variable: usos del suelo	41
Tabla 7: Matriz de la variable topografía	43
Tabla 8: Matriz de la variable: Distancia	46
Tabla 9: Matriz de la totalidad de las variables	46
Tabla 10: Porcentaje de AC vs. disponibilidad para brócoli en el 2050	61
Tabla 11: Porcentaje de AC vs. disponibilidad para arveja en el 2050	63

Tabla 12: Área de las zonas con buena aptitud para brócoli en el futuro	65
Tabla 13: Área de las zonas con buena aptitud para arveja en el futuro	67
Tabla 14: Porcentaje de disponibilidad para arveja dulce.....	79

Lista de figuras

Figura 1: Área de Estudio en Guatemala.....	25
Figura 2: Aptitud climática actual de brócoli.....	31
Figura 3: Aptitud climática para el brócoli en el 2050.....	32
Figura 4: Aptitud climática actual para arveja dulce.....	33
Figura 5: Aptitud climática para arveja dulce en el 2050.....	34
Figura 6: Resultado de la matriz de usos del suelo	42
Figura 7: Mapa con los valores ponderados de topografía para arveja	44
Figura 8: Mapa con los valores ponderados de topografía para brócoli	45
Figura 9: Aptitud mayor a 40% en el presente para brócoli	48
Figura 10: Aptitud mayor a 40% en el presente para arveja	49
Figura 11: Proyección del comportamiento de la temperatura y la precipitación al el año 2050.....	50
Figura 12: Áreas protegías, zonas de amortiguamiento y áreas a de cultivo.....	52
Figura 13: Cultivos perennes y de corto ciclo	53
Figura 14: Distribución de bosques en del altiplano guatemalteco	54
Figura 15: Distancia a vías cercanas	55
Figura 16: Altura apropiada para brócoli	57
Figura 17: Altura apropiada para arveja.....	58

Figura 18: Disponibilidad para brócoli	59
Figura 19: Disponibilidad para Arveja	60
Figura 20: Comparación de AC actual y futura para Brócoli	62
Figura 21 Porcentaje de pérdida de AC para el cultivo del brócoli.....	63
Figura 22 Comparación de AC actual y futura para Arveja.....	64
Figura 23 Porcentaje pérdida de AC para el cultivo de Arveja.....	64
Figura 24 Comparación del área con buena AC para brócoli en la actualidad y en el año 2050	66
Figura 25: porcentaje de pérdida de área apta para brócoli hasta el año 2050	66
Figura 26 : Comparación del área con buena AC para Arveja en la actualidad y en el año 2050	67
Figura 27: porcentaje de pérdida de área apta para arveja hasta el año 2050.....	68
Figura 28: Brócoli, aptitud climática mayor a 40% en el presente	69
Figura 29: Brócoli, aptitud climática mayor a 40% en el futuro	70
Figura 30: Comparación del área con buena AC para brócoli	71
Figura 31: Perdida de área con buena Ac al año 2050.....	72
Figura 32: Arveja, aptitud climática mayor a 40% en el presente	72
Figura 33: Arveja, aptitud climática mayor a 40% en el futuro	73
Figura 34: Comparación del área con buena AC para arveja	74
Figura 35: Perdida de área con buena Ac al año 2050.....	74
Figura 36: comparación de zona de bosque y zonas que podrían ganar AC a futuro	76
Figura 37: Disminución de Área con buena AC para Brócoli, con relación a la extensión actual	77

Figura 38: Disminución de Área con buena AC para Arveja, con relación a la extensión actual 77

Figura 39: Puntos de presencia de cultivos de brócoli y arveja 78

RESUMEN

El Área de Apoyo a Decisiones y Políticas (DAPA, por sus siglas en inglés) que hace parte del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), desarrolló una metodología para la evaluación del impacto del cambio climático en función de la seguridad alimentaria. A mediados del año 2011, esta metodología fue aplicada en comunidades de productores agrícolas de Guatemala asociados a la cooperativa ADAM¹/Oxfam² y la asociación de pequeños productores SUMAR³.

Un paso fundamental para el desarrollo de dicha metodología, es la evaluación de la aptitud climática (AC) que podrían tener algunos cultivos importantes para la región de estudio. Sin embargo, dado que este factor (aptitud climática) no es el único que puede restringir el crecimiento de un cultivo, el presente trabajo se concentró en la identificación de otro tipo de restricciones espaciales (e.g., uso de la tierra, accesibilidad [distancia parcela-vía] y topografía). Cada variable, a su vez, involucró diferentes limitaciones que definieron en distinto grado la posibilidad de cultivar.

Para la aplicación del modelo de evaluación espacial del presente estudio, se escogieron los cultivos de brócoli y arveja por la importancia económica que tienen para los habitantes de la región. Finalmente se integraron los resultados de AC producido por el CIAT y los resultados del modelo de evaluación espacial producto del presente trabajo, mediante técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) en unión con la extensión AHP del programa ArcGIS 9.3.

Palabras claves: Cambio climático, Aptitud climática, Variables espaciales, Restricciones espaciales, Usos del suelo, Cultivos, Brócoli, Arveja, AHP

¹ ADAM: Asociación para el Desarrollo Agrícola y Microempresarial.

² Oxfam: Es una confederación internacional de 15 organizaciones que trabajan conjuntamente con distintos países para conseguir un desarrollo sostenible. Consultado en: <http://www.oxfam.org>

³SUMAR: Asociación de pequeños agricultores propia de la región Chimaltenango y Sololá

INTRODUCCIÓN

El tema del cambio climático y su afectación a la agricultura ha despertado mucho interés en los investigadores. La región Centroamericana ha sido testigo de la manifestación de estos efectos a través de importantes desastres naturales, los cuales han implicado pérdidas significativas en el sector agrícola. A este respecto Harmeling (2007) señala que los países centroamericanos se encuentran entre aquellos con alto riesgo climático.

Según el IPCC (2009), diversos estudios concluyen que el cambio climático haría disminuir los ingresos de poblaciones vulnerables y aumentar el número absoluto de personas con riesgo de pasar hambre, aunque esto es inseguro y requiere más investigación.

Así mismo, numerosos expertos opinan que, tanto el agua como su disponibilidad y calidad serán los principales factores de presión y el principal tema de debate en el contexto de las sociedades y del medio ambiente afectado por el cambio climático; por consiguiente, es necesario ahondar en el conocimiento de los problemas que el fenómeno climático trae consigo.

Preocupándose siempre por la agricultura sostenible, el Área de Investigación DAPA del CIAT, ha proyectado los cambios en las condiciones de aptitud climática de varios cultivos en la región Centroamericana al año 2050, encontrando que efectivamente la región presentará algunos cambios significativos.

La economía de la mayoría de los países de Centro América es considerablemente dependiente del sector agropecuario y, por tal razón, sensible ante cambios en el clima. Esta importante relación entre el agro y el clima crea la necesidad de analizar el panorama de la agricultura en la región y estimar qué tanto el cambio climático podría generar situaciones adversas para su desarrollo. Para dicho análisis se tomó en cuenta Guatemala, específicamente la zona del Altiplano. Allí la producción de hortalizas está amenazada constantemente por eventos climatológicos.

El presente trabajo tiene como objetivo identificar las zonas idóneas para los cultivos de Brócoli y arveja en el altiplano Guatemalteco. Estos cultivos se han convertido en parte fundamental de la economía del país por dos aspectos. El primero, su aporte significativo al PIB nacional en las exportaciones y, el segundo, los ingresos que genera a las familias productoras.

Un aspecto importante que tomó en cuenta esta investigación es que los resultados del modelo representan la AC de la zona para el crecimiento de los cultivos de Arveja y Brócoli según sus requerimientos climáticos y los factores que pueden restringir total o parcialmente el establecimiento de los cultivos, tomando en cuenta: cuerpos de agua, zonas construidas, bosques, áreas protegidas y sus correspondientes zonas de amortiguamiento (espaciamientos entre los límites de las zonas protegidas y su entorno inmediato). Cabe destacar que algunos tipos de restricciones no imposibilitan totalmente el establecimiento de algún cultivo, sin embargo, fueron tomadas en cuenta ya que debe considerarse el impacto causado al medio ambiente si llegase a destinarse un área determinada para el aprovechamiento de la agricultura.

Se analizó, de igual manera, la cercanía a vías de acceso, tomando en cuenta que la distancia entre vía y parcela influyen en los costos de producción y de transporte. La cercanía a vías o centros poblados es importante según el tipo de cultivo que se esté manipulando. Por ejemplo, para aquellos cultivos que son perecederos, es muy importante transportarlos rápidamente para su posterior almacenamiento (Pender, et al., 2004).

Finalmente, este trabajo pretende brindar información que vaya más allá de los requerimientos, es decir, en la medida que se logre describir mejor un territorio, los elementos espaciales que lo componen y la relación entre ellos, se puede reducir la incertidumbre respecto al futuro. De esta manera, las autoridades competentes pueden determinar alternativas apropiadas en cuanto a diversificación de cultivos, manejo adecuado de los recursos hídricos, recursos ambientales, entre otros.

JUSTIFICACIÓN

Durante los últimos 20 años la agricultura ha contribuido con el 10% del Producto Interno Bruto (PIB) de los países latinoamericanos, por lo cual es un sector sumamente importante para la economía regional. Además, emplea aproximadamente del 30% al 40% de la población económicamente activa. Asimismo, juega un papel fundamental para la seguridad alimentaria de los sectores más pobres de la población (IPCC, 2001).

En el caso de Guatemala la agricultura sigue siendo el sector productivo de gran importancia. El 61% de la población habita el área rural y depende de esta actividad para satisfacer sus necesidades de ingresos, la Población Económicamente Activa (PEA) agrícola constituye el 58,6% del total, es decir, alrededor de 1.86 millones de personas laboran en el sector. El 23,9% del PIB es generado en el sector agropecuario y aún aporta el 61,5% de las divisas por exportaciones (MAGA, 2011). Sin embargo, durante los últimos años el sector ha experimentado una reducción de su importancia en la economía mundial y en las economías locales dados los cambios bruscos en temperatura. Ante tal escenario, la producción de hortalizas realizada en su mayoría en la región del Altiplano Guatemalteco ha sido la principal afectada (IARNA, 2007).

El brócoli y la arveja de distintas variedades son cultivos no tradicionales que se exportan y generan divisas a este país. Esta situación hace que algunas familias del Altiplano sean totalmente dependientes de la comercialización de esos cultivos. Sin embargo, como consecuencia de los efectos del cambio climático, la producción de estos estará en riesgo, pues las proyecciones indican que los aumentos en temperatura pronosticados reducirán los rendimientos de los cultivos de la región (IPCC, 2001). Además, en el Cuarto Informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) se menciona que el cambio climático afectará la agricultura en todos los países y en gran medida afectará a los países Centroamericanos (IPCC, 2007).

Considerando la importancia de los cultivos de Brócoli y Arveja para la población rural de Guatemala, DAPA, ha proyectado los cambios en las condiciones de aptitud climática de estos cultivos al año 2050. Los resultados del análisis demostraron que las zonas óptimas y disponibles para su producción de los dos cultivos sufrirían cambios significativos.

El desarrollo de este trabajo permite obtener elementos claves para determinar el nivel de acogida de la zona estudiada con respecto al crecimiento y buen desarrollo de los cultivos de Brócoli y Arveja, teniendo en cuenta el uso del suelo

del territorio y el área total disponible para la siembra de cultivos. Todo esto con el fin de determinar el posible efecto que el cambio climático tendría al pasar de los años y la afectación que podría provocar con dichos rubros.

Por lo tanto, esta investigación podría generar beneficios a nivel nacional y local, puesto que se aportará un modelo espacial que puede ser replicado en distintos cultivos y en distintos lugares para ayudar a los entes decisores a definir políticas agrícolas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar zonas idóneas para el cultivo de Brócoli y arveja dulce en el altiplano Guatemalteco.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el posible efecto del cambio climático sobre la distribución potencial y la aptitud climática de los cultivos de brócoli y arveja dulce en la zona de estudio.
- Identificar las variables que restringirían la distribución potencial de los cultivos mencionados, en el altiplano Guatemalteco.
- Desarrollar un modelo espacial para determinar las zonas potenciales para el crecimiento de los cultivos de brócoli y arveja dulce teniendo en cuenta el cambio climático hacia el año 2050.

2. MARCO REFERENCIAL

1.3 MARCO CONCEPTUAL

A continuación se describen algunos conceptos utilizados para el desarrollo del presente trabajo.

1.3.1 Cambio climático

El mundo vive momentos decisivos y debe tomar acciones que le permitan enfrentar los problemas que se avecinan, algunos de ellos ya se están manifestando y en su mayoría son causados por el mismo ser humano. Un ejemplo es el cambio climático (CC), que trae consigo múltiples consecuencias de mucha importancia para todo el planeta, amenazando el modo de vida que conocemos hasta el momento. Campos (2010), cita al IAI⁴ para definir el CC de la siguiente manera: “[...] se refiere a las modificaciones del medio ambiente mundial (incluyendo alteraciones del clima, la productividad de la tierra, los océanos y otros recursos hídricos, la química atmosférica y los sistemas ecológicos) que puedan alterar la capacidad de la tierra para sustentar la vida”

Según la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO, 2010), los eventos climáticos extremos regularmente afectan múltiples sectores, incluyendo agricultura, seguridad alimentaria, recursos hídricos y salud. La variabilidad climática puede desestabilizar y provocar pérdidas de los cultivos, reducción de las fuentes de irrigación de agua, inseguridad alimentaria y hambre. Los impactos de los eventos extremos como las sequías, las inundaciones y los ciclones, frecuentemente se acumulan y retrasan los avances para alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio en pobreza, hambre y salud.

⁴ El Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), memoria del 10º Congreso Nacional del Medio Ambiente. www.ipcc-data.org

1.3.2 Modelos predictivos

Según el IPCC (1997), los modelos numéricos (Modelos de Circulación General o MCG), en representación de los procesos físicos en la atmósfera, los océanos, la criósfera y la superficie terrestre, son las herramientas más avanzadas disponibles actualmente para simular la respuesta del sistema climático mundial frente al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Si bien los modelos más simples también se han utilizado para proporcionar a nivel mundial y regional estimaciones de la respuesta al cambio climático, sólo los MCG, posiblemente en conjunción con los modelos regionales anidados, tienen el potencial para proporcionar estimaciones geográfica y físicamente coherente del cambio climático a nivel regional, información esencial para el análisis del impacto causado por el CC⁵.

1.3.3 Adaptación al cambio climático

En el futuro se podrían presentar eventos climáticos muy peligrosos, sobre todo para la calidad de vida ya subsistencia del ser humano. En especial para aquellos sectores de la población (e.g., pequeños y medianos agricultores) que no cuentan con información suficiente sobre los cambios climáticos que están ocurriendo, y la manera cómo deberían enfrentarlos. Por lo tanto, es imprescindible apoyar a los productores de alimentos en el campo, lo cual puede ser una estrategia para garantizar el sostenimiento de sus familias y la seguridad alimentaria de los centros urbanos.

Es necesario concentrarse particularmente en los medianos y pequeños productores del campo, pues están expuestos y son vulnerables ante los eventos que se avecinan. El término vulnerabilidad lo define Lagos (2010) así “[...] Medida en que un sistema es capaz o incapaz de afrontar los efectos negativos del cambio climático, incluso la variabilidad climática y los eventos extremos. La vulnerabilidad está en función del carácter, como en la magnitud y el índice de variación climática a que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación”.

Pero dada la escasa información y los escasos medios para vivir que tienen los pequeños agricultores, los efectos de fenómenos como el cambio climático

⁵ Consultado en www.ipcc-data.org

pueden ser nefastos para su supervivencia. Siendo afectados directamente por su relación directa con el campo y, por supuesto, con la seguridad alimentaria de todas personas que están directa e indirectamente vinculadas con la comercialización de los productos agrícolas.

1.3.4 Aptitud climática (AC) de cultivos, predicción EcoCrop

En el manual de procedimiento de DIVA-GIS (Robert J. Hijmans, et al., 2004), los autores se refieren a esta herramienta como una un programa de acceso libre que sirve para analizar datos geográficos. Es particularmente útil para mapear y analizar datos de biodiversidad, tales como distribución de especies animales o predicción de AC de cultivos (EcoCrop es el modelo de nicho ecológico hospedado en DIVA-GIS usado para esta última tarea).

El manual menciona además que de acuerdo con la FAO, EcoCrop puede ser usado para asistir en la identificación de especies candidatas para ambientes definidos. Pudiendo predecir la AC de un cultivo sobre áreas geográficas a partir de parámetros de temperatura y precipitación. Existen tres áreas que definen la AC de un cultivo determinado; condiciones óptimas, condiciones marginales y condiciones de no-aptas o de muerte. La herramienta busca los lugares donde los valores óptimos de precipitación y temperatura concuerdan, y a esos les asigna el mayor porcentaje de AC, a medida que los valores de precipitación y temperatura del área de análisis se alejan de las condiciones óptimas, el porcentaje de AC disminuye, presentando un mapa con gradaciones de colores que identifican las siguientes zonas: excelente, muy adaptable, adaptable, marginal, muy marginal, no adaptable.

1.3.5 Desarrollo sustentable.

El desarrollo sustentable es el producto de la combinación de múltiples factores y actores que se unen para buscar el beneficio común para el presente y también los años que se avecinan. Según Artaraz (2002) citado por Ramirez Sanchez (2009), “para alcanzar el desarrollo sustentable es necesario que las políticas y acciones para lograr el crecimiento económico respeten el ambiente y además sean socialmente sostenibles”.

Por lo tanto, es necesario empezar a pensar en las generaciones futuras para que puedan disponer de los recursos necesarios para su bienestar. Según lo expresa la Comisión del Desarrollo y Medio Ambiente, citada en Ramírez et al., (2004: 55):

El desarrollo sustentable, debe ser encaminado a satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, pero sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras.

El concepto de sustentabilidad se fundamenta en el reconocimiento de los límites y de las potencialidades de la naturaleza, así como en la complejidad ambiental (Ramirez Sanchez, 2009).

Según la FAO (2012), el hambre y la pobreza obligan a las personas de menores recursos a explotar los recursos naturales de los cuales dependen sus propios medios de subsistencia y alimentación. Sin embargo, la variedad de bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas (agua limpia, suelos fértiles, paisajes, diversidad biológica y fijación del carbono, entre otros) deben gestionarse en forma tal que sustente a la población, no sólo para satisfacer sus necesidades de alimentos, sino también otra serie de necesidades económicas, sociales y ambientales.

1.3.6 Conocimiento local y científico

Generalmente, los agricultores conocen muchas de las propiedades y características de su territorio, sin embargo, sería ideal soportar ese conocimiento con los avances que ha hecho la ciencia para optimizar esfuerzos y mejorar las estrategias de adaptación según las condiciones cambiantes que se perciben en el planeta.

Con el propósito de disminuir la incertidumbre respecto al futuro y de optimizar los esfuerzos y recursos invertidos en minimizar los efectos adversos que trae el cambio del clima, existen herramientas y modelos matemáticos para realizar análisis de manera muy específica para cada sitio y situación. Entre ellas se pueden mencionar las modelaciones del clima, modelaciones de aptitud climática de cultivos frente cambio climático y sistemas para el procesamiento de información de tipo espacial, estos conocimientos científicos unidos con el conocimiento que cada agricultor posee, podrían constituir una fuerte alianza para mitigar los efectos negativos del cambio climático.

1.3.7 El análisis o Evaluación Multicriterio (EMC)

Barrero C., (1996) define la EMC como “[...] un conjunto de técnicas orientadas a asistir en procesos de decisión”. Por otro lado UGR (2000) menciona que este método “[...] Se basa en la ponderación y compensación de variables que van a influir de manera positiva (Aptitud) o negativa (Impacto) sobre la actividad objeto de decisión y que deben ser inventariados y clasificados previamente”

1.3.8 Método AHP (Analytic Hierarchy Process), o PAJ (Proceso de Análisis Jerárquico)

Estudios como el realizado por Barrero (1996), han demostrado que la integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG.) y los procedimientos de Evaluación Multicriterio (EMC), permiten encontrar soluciones a problemas complejos relacionados con información geográfica, espacial y temática.

Uno de los procedimientos de EMC más usados en el Proceso de Análisis Jerárquico o AHP (Saaty, 1980), por sus siglas en inglés. Este procedimiento se ha venido utilizando en una amplia variedad de estudios relacionados con el análisis espacial.

Esta técnica facilita la asignación de pesos a las variables analizadas de acuerdo al grado de importancia que tengan dependiendo del contexto. Este proceso que se hace mediante la comparación por pares, es decir, se compara cada uno de los elementos con todos los demás. De esta manera se puede dimensionar de manera fácil la importancia relativa de las variables.

Los valores de importancia de cada variable van de 1/9 a 9, el valor depende la contribución de ésta para conseguir un objetivo en comparación con otra de las variables del análisis. Ver Tabla 1.

Tabla 1 Valores sugeridos por Saaty para representar la importancia de las variables

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9	2,4,6,8
Extrema baja	Muy baja	Baja	Media baja	Igual	Media alta	Alta	Muy alta	Extrema Alta	Diferencia muy leve

Fuente: Galacho F., Ocaña C. (2009), pag.1520

Además de ello, este método permite evaluar la consistencia de la asignación de los pesos dados por el decisor, estableciéndose un umbral o *ratio⁶ de consistencia* (RC) de 0.1 como el valor máximo para que el procedimiento sea considerado consistente, obligando a reconsiderar la distribución de los pesos si el valor RC

⁶ Relación o proporción que se establece entre dos cantidades o medidas

final está por encima del umbral mencionado. El valor **RC** se obtiene según lo explica García et al., (2006), de la siguiente manera:

Se incorpora primero un Índice de Consistencia (**IC**) y una Relación de Consistencia (**RC**), para medir la calidad de los juicios emitidos por un decisor.

$$IC = \frac{\lambda_{MAX-n}}{n-1} \quad (1)$$

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (2)$$

El índice **RC** está en función de **IC** y de **IA**, donde este último representa un Índice Aleatorio, estimado del promedio del IC de 500 matrices recíprocas positivas generadas de manera aleatoria (Saaty 1992). El **RC** es una medida de la relación del error cometido por el decisor y el error aleatorio, este debe ser menor al 0,1 ó 10%. La Tabla 2Error! Reference source not found. muestra los **IA** para diferentes números de atributos, los cuales son representados por **n** y este a su vez indica el tamaño de la matriz de comparaciones apareadas.

Tabla 2: valores de Índice Aleatorio (IA) según el número de variables (n)

n	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0,58	90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fuente: García et al., (2006)

Para el desarrollo del método se creó una matriz con las variables consideradas, posteriormente se hace la comparación por cada elemento asignando valores entre 1/9 y 9, o su reciproco, siendo el numero 1/9 el valor para el criterio menos importante y 9 el valor para el más importante, donde 1 representa la igualdad de la importancia de la siguiente forma:

Finalmente se establece un *eigenvector*⁷ principal útil para establecer los pesos respectivos según la importancia que tiene una sobre otra variable (Saaty, 1980) citado por (Galacho Jiménez & Ocaña, Ocaña, 2006).

⁷ “En álgebra lineal, los vectores propios, autovectores o eigenvectores de un operador lineal son los vectores no nulos que, cuando son transformados por el operador, dan lugar a un múltiplo escalar de sí mismos, con lo que no cambian su dirección. Este escalar λ recibe el nombre valor propio, autovalor, valor característico o eigenvalor” (Giménez & Federico, 2009)

3. METODOLOGÍA

1.4 ZONA DE ESTUDIO

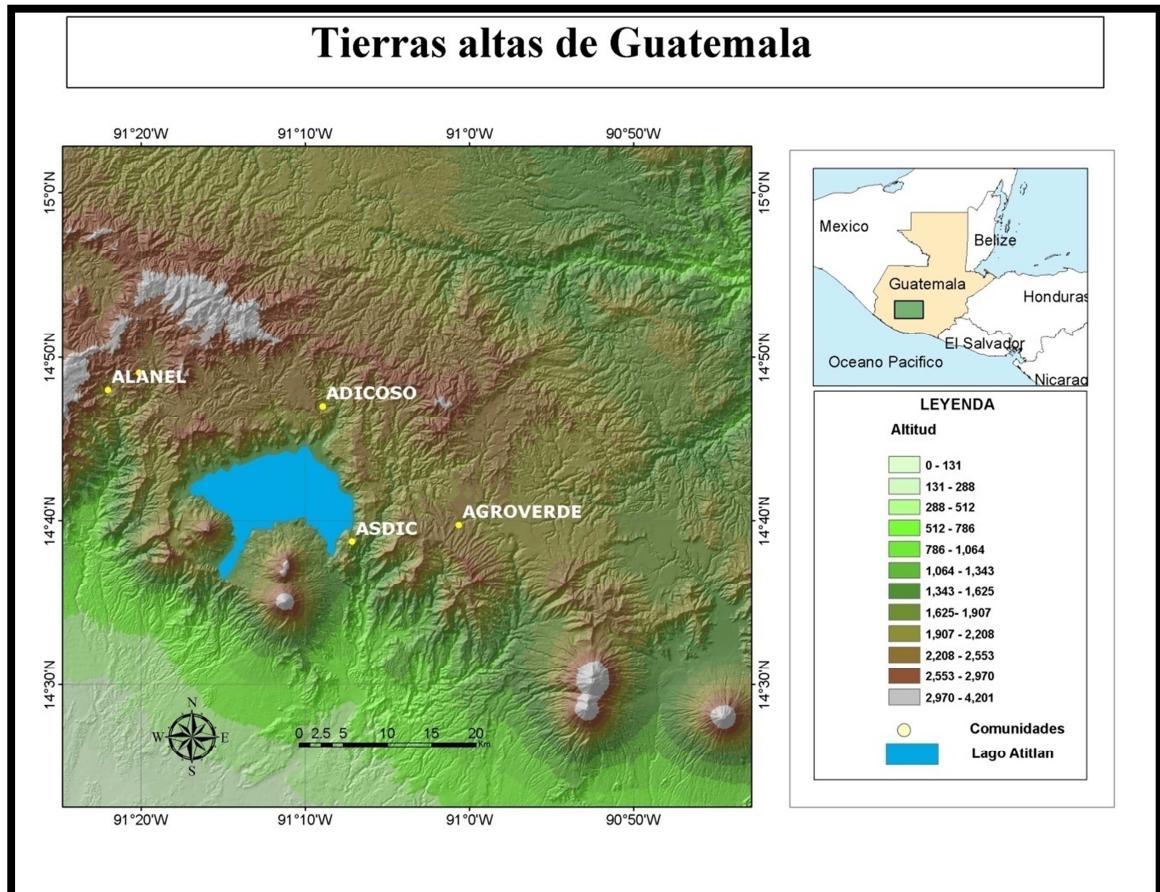
1.4.1 Tierras Altas de Guatemala

Las tierras altas comprenden dos cordilleras paralelas, la sierra de los Cuchumatanes y el sistema de la sierra Madre, continuación de la cordillera mexicana del mismo nombre, que atraviesa Guatemala de oeste a este y divide al país en dos mesetas de extensión desigual.

➤ Geografía.

La zona de estudio abarca los departamentos de Sololá y Chimaltenango, en el altiplano de Guatemala. Está entre los años 2.000 a 2.500 metros sobre el nivel del mar (msnm). Sololá se caracteriza por tener montañas escarpadas y valles encerrados, mientras que Chimaltenango se caracteriza por sus zonas planas. Numerosos ríos que desembocan en el Pacífico, se originan en esas tierras donde los agricultores utilizan el agua superficial para el riego de sus campos. En la **Error! Reference source not found.**, se muestra el área de estudio, las comunidades participantes y en color lila las zonas donde se producen vegetales.

Figura 1: Área de Estudio en Guatemala



Fuente: CIAT

➤ Clima.

Las tierras altas de Guatemala se caracterizan por un régimen climático variado. La estación seca va desde octubre hasta principios de mayo y la temporada de lluvias desde finales de mayo hasta finales de septiembre, con un período de poca lluvia en julio y agosto, a menudo llamado "canícula" por los lugareños. La temperatura media anual en la sierra central es de 20 °C, y en las montañas más altas de 15 °C. Durante los meses secos, hay también presencia de heladas que suelen afectar los cultivos.

➤ Cultivos.

La agricultura en pequeña escala es la principal fuente de ingresos en esta área. Los agricultores siembran una gran variedad de cultivos, tales como el brócoli, la arveja, el calabacín, la zanahoria, cebolla, tomate, maíz y el frijol.

➤ Economía.

Guatemala tiene la mayor economía de América Central con un PIB de US\$2,507 per cápita. Sin embargo, aproximadamente el 74% de los hogares rurales viven en la pobreza (menos de 2 dólares americanos diarios por persona). La situación se ve aún peor cuando se considera el hecho de que la contribución de la agricultura al PIB tuvo un marcado descenso del 23% en el 2000 y de 11% en 2008.

Sin embargo, la agricultura sigue ocupando el 52,9% de la fuerza laboral del país. Con aproximadamente el 61% (8'300.000 de habitantes) de la población viviendo en la zona rural, el desarrollo sostenible en el campo es un aspecto que debe ser tratado con la máxima urgencia⁸.

1.5 METODOLOGÍA DEL CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT) PARA LA MODELACIÓN DE CULTIVOS CON MODELOS CLIMÁTICOS

El CIAT estableció una metodología para la modelación de cultivos para el presente y el futuro (teniendo en cuenta el cambio climático y la vulnerabilidad de las comunidades objeto de estudio). Este proceso comprendió, entre otras cosas: la recopilación y reducción de escala (*Downscaling*) de los datos de clima actual y futuro, tal como se verá en los siguientes apartados.

-
- ⁸ Datos del proyecto en marcha para el fortalecimiento de la cadena de valor
 - en las tierras altas de Guatemala, en alianza con Sustainable Food Lab.

1.5.1 Modelos de clima actual

Para los registros de clima actual o de línea de base, se utilizaron los datos históricos del clima de la base de datos WorldClim, disponible en: www.worldclim.org (Hijmans, et al., 2005). Los datos WorldClim fueron generados a través de interpolación de la media de los datos climáticos mensuales de estaciones meteorológicas entre 1950 y 2000. Su resolución es de 30 segundos de arco (aproximadamente "1 km" de resolución en el ecuador). Las variables incluidas son la precipitación total mensual, y la media mensual, temperatura máxima y mínima, y 19 variables bioclimáticas (Hijmans, et al., 2005), derivadas de la temperatura y la precipitación.

1.5.2 Generación del clima del futuro

El IPCC, basó su cuarto Informe de evaluación del CC en los resultados de MCG. Estos modelos están disponibles en el sitio Web del IPCC, o directamente en las páginas de las instituciones que han desarrollado cada modelo. La resolución espacial de estos modelos es aproximadamente 100 km por cada lado del píxel⁹. Teniendo en cuenta que se realizaron análisis de los impactos del CC sobre la agricultura, ésta resolución no es adecuada, especialmente en paisajes heterogéneos, tales como las de los Andes, donde, un píxel o celda puede cubrir todo el ancho del sitio de interés.

La reducción de la escala es, por lo tanto, necesaria para proporcionar una mayor resolución de la información, pudiendo realizar análisis más específicos, especialmente cuando se trata de estimar el impacto sobre pequeñas áreas cultivadas.

Se utilizó un método de reducción de escala llamado "delta", basado en la suma de anomalías interpoladas a gran resolución de las coberturas climáticas mensuales obtenidas por el aporte de Hijmans et al. (2005). El método,

-
- ⁹ Definición de *pixel* : cada elemento discreto en los que se divide una imagen digital
 - tecnicismo de origen inglés que procede de la contracción de picture element. (creo que la definición puede confundir más, debería explicarse de manera más sencilla).

básicamente, produce superficies suaves (interpoladas) y produce las superficies de los cambios en el clima (deltas o anomalías). Luego se aplica esta superficie interpolada al clima de referencia (WorldClim), teniendo en cuenta el posible sesgo debido a la diferencia en las líneas base. El método supone que los cambios en el clima son sólo relevantes a escala gruesa, y que las relaciones entre las variables se mantienen hacia el futuro (Jarvis & Ramirez, 2010).

El CIAT obtuvo los datos de la Red de Monitoreo del Sistema Tierra (ESG) y aplicó el método de reducción de escala en más de 19 modelos de circulación general del cuarto Informe de Evaluación del IPCC (Solomon et al., 2007). Se trabajó con el escenario de emisiones SRES-A2 para promedios de 30 años por cada periodo procesado, es decir, 2010-2039 (2020), 2040-2069 (2050) y así sucesivamente hasta el 2070-2099 (2080). Cada conjunto de datos (escenario SRES - GCM - intervalo de tiempo) se compuso de cuatro variables para cada mes, estas fueron: temperatura media, temperatura máxima, mínima y precipitación total, en una resolución espacial de 30 segundos de arco (Jarvis & Ramirez, 2010).

En resumen, el procedimiento que CIAT siguió para la reducción la escala según consignaron en Jarvis & Ramirez (2010) es el siguiente:

1. Recopilación de datos climáticos de base (clima actual que corresponde a la base de datos climática WorldClim).
2. Recopilación de modelos los climáticos.
3. Calculo de promedios del clima, empezando por el presente (años 1961-1990) y 7 periodos para el clima futuro, promediando los periodos cada treinta años.
4. Cálculo de anomalías, es decir la diferencia absoluta entre los valores futuros de cada una de las 3 variables a interpolar (temperatura mínima y máxima, y precipitación total).
5. Interpolación de las anomalías usando los centroides de los pixeles como puntos para la interpolación.

6. Suma de las superficies interpoladas y los ráster¹⁰ de clima actuales de WorldClim, usando la suma absoluta de temperaturas, y sumando los cambios relativos de la precipitación.

7. Cálculo de la temperatura media como el promedio de los ráster de máxima y mínima temperatura.

1.5.3 Modelación de aptitud climática de cultivos

El CIAT realizó modelación de cultivos al CC a partir del conocimiento de los sitios en donde se cultivan los principales productos agrícolas de la región. Con las modelaciones preliminares se identificaron puntos críticos en los cuales se observaron cambios muy drásticos. Se identificaron los lugares prioritarios con visitas de campo para tomar coordenadas, realizar talleres con la comunidad y hacer la modelación con precisión y aplicada a los focos vulnerables de la zona. Las coordenadas tomadas se convirtieron entonces en puntos de presencia a partir de los cuales se pudieron encontrar otros lugares con condiciones climáticas similares.

A continuación se presentan los resultados de las modelaciones que el CIAT ha hecho para brócoli y arveja dulce, considerados dos de los cultivos principales para las comunidades del altiplano Guatemalteco. Los resultados fueron validados con expertos locales, quienes conocen la zona y afirmaron que efectivamente son sitios aptos para el aprovechamiento de cada uno de los cultivos mencionados.

Los rangos de la leyenda corresponden a una aptitud climática distribuida entre 0 y 100%. Se manejó esta escala para la interpretación de los resultados.

0-20%: muy baja AC.

20-40%: baja AC.

40-60%: buena AC.

60-80%: muy AC.

80-100%: AC.

¹⁰ Definición de raster: Arreglo digital de rectángulos regulares y de igual tamaño

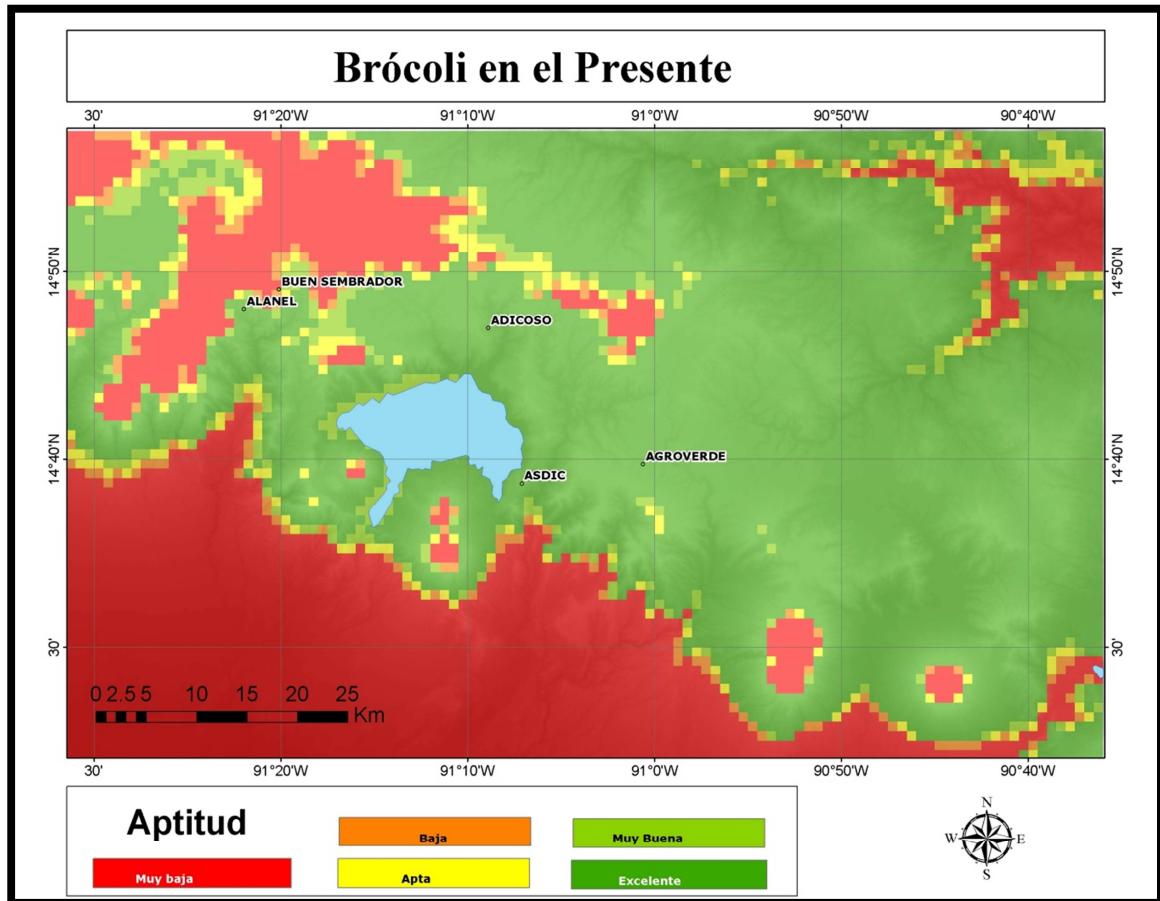
1.5.3.1 Brócoli

Según los resultados de CIAT, los agricultores informaron que en la zona ha habido descensos del rendimiento del brócoli. Se piensa que han sido causados por la alta variabilidad de los patrones de lluvia. Esto puede significar sequías inusuales, seguido por lluvias excesivas. Sin embargo en los resultados de las modelaciones hechas para el futuro (año 2050), no hay cambios significativos de la aptitud climática en toda la región.

✓ **Aptitud climática actual del brócoli**

Según las modelaciones realizadas para brócoli, las condiciones climáticas actuales permiten que la mayoría de las tierras altas de Guatemala sean adecuadas para el aprovechamiento del cultivo.

Figura 2: Aptitud climática actual de brócoli

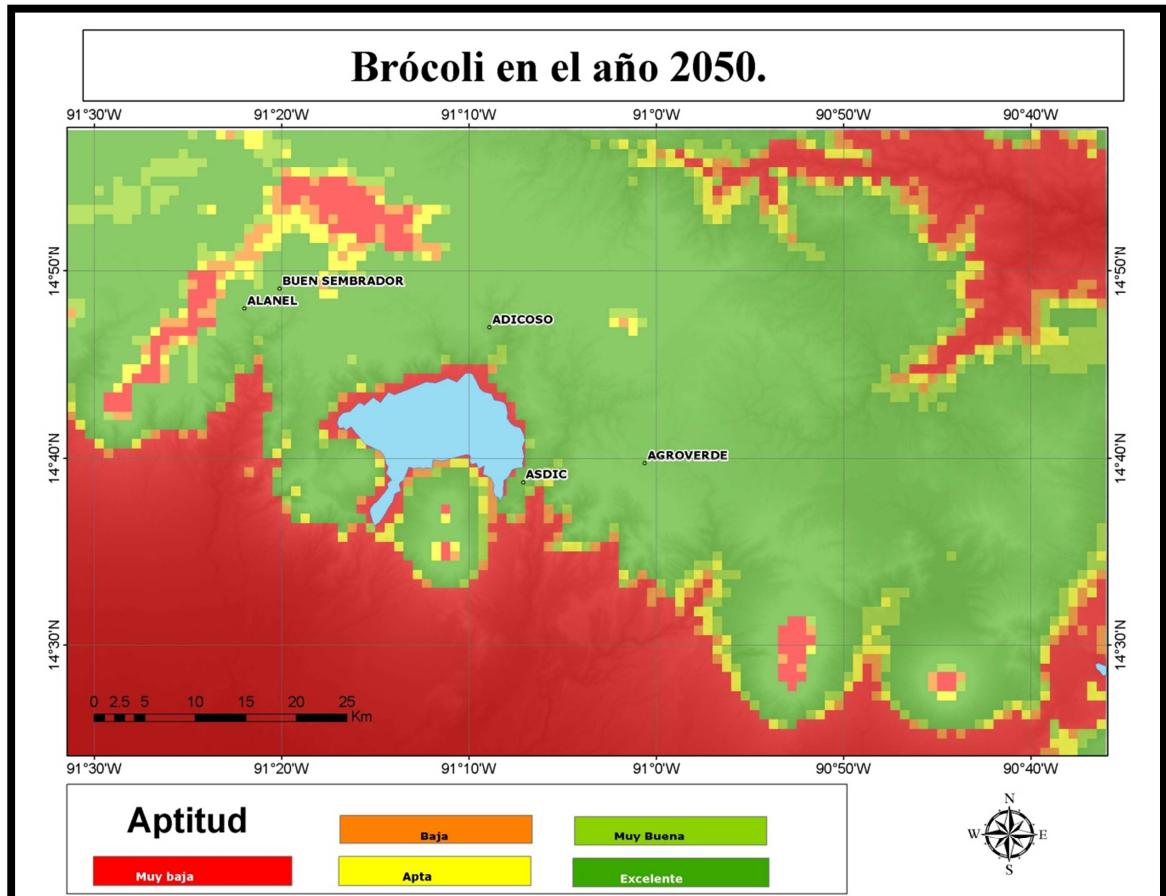


Fuente: CIAT

✓ Aptitud climática futura (2050) del brócoli

Los mapas de AC para el 2050 muestran que se conservaría la tendencia de la ampliación de áreas adecuadas en la parte noreste de la zona de estudio, la cual corresponde al departamento de Sololá. Por su parte, las áreas con AC baja comenzarían a crecer en extensión en los lugares fuera de Sololá (Figura 3).

Figura 3: Aptitud climática para el brócoli en el 2050.



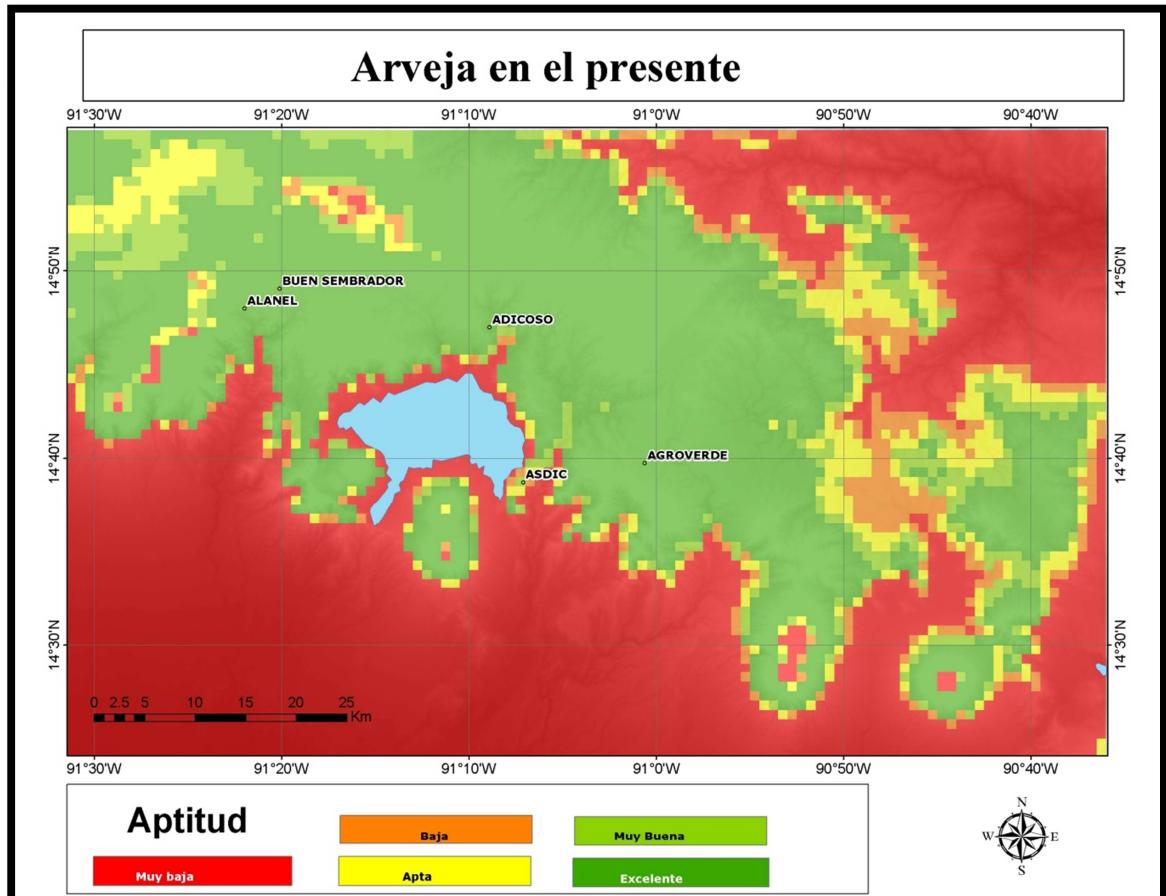
Fuente: CIAT

1.5.3.2 Arveja dulce

✓ Aptitud climática actual de la arveja

Durante los meses más secos y fríos, la arveja continúa creciendo con normalidad en las zonas donde se presentan las condiciones climáticas apropiadas para su desarrollo. Contrario a lo que sucede con el brócoli, el cual requiere menor temperatura y mayor precipitación que la arveja. Ver Figura 4.

Figura 4: Aptitud climática actual para arveja dulce

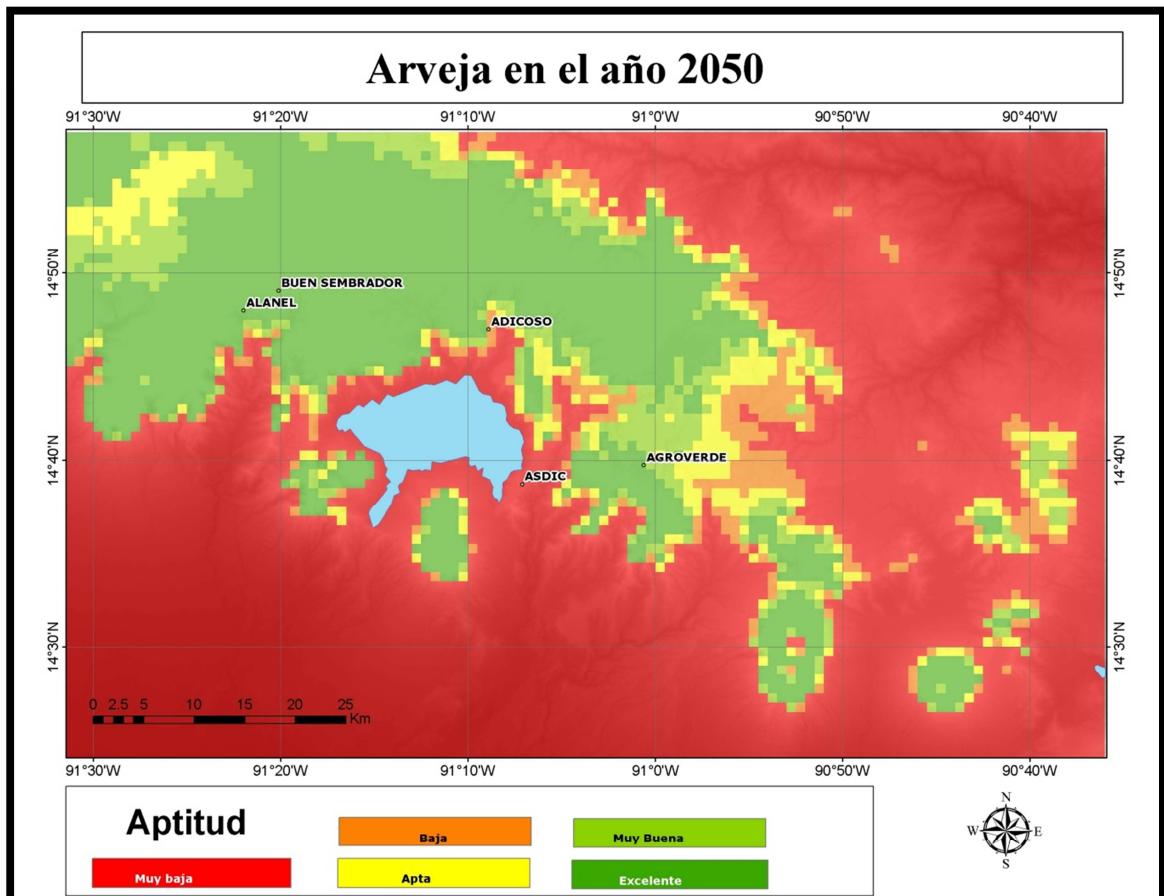


Fuente: CIAT

✓ **Aptitud climática futura (2050) de la arveja**

Mientras que todas las comunidades tienen buenas condiciones para la arveja dulce bajo las condiciones climáticas actuales, las proyecciones al año 2050 muestran una disminución de la AC para este cultivo en la región, afectando grandes áreas en Tecpán, Patzún y San Antonio de Palopó (Figura 5).

Figura 5: Aptitud climática para arveja dulce en el 2050



Fuente: CIAT

1.6 DESARROLLO DEL MODELO DE RESTRICCIONES ESPACIALES E INTEGRACIÓN CON LAS MODELACIONES DEL CIAT

El procesamiento consistió en la extracción, verificación y análisis de datos climáticos para la zona del altiplano guatemalteco. Además de la elaboración de un modelo para la disponibilidad de tierras de los cultivos de brócoli y arveja. Esto se hizo mediante la verificación de las variables pertinentes según las encuestas realizadas por el CIAT en estudios anteriores. Finalmente se integraron los resultados de la modelación de aptitud climática que CIAT hizo en el año 2011 y los resultados del modelo de disponibilidad de usos del suelo de la zona de estudio. Todo esto con el fin de identificar las zonas potenciales para sembrar los

cultivos, dadas sus buenas características tanto climáticas como de usos del suelo.

1.6.1 Determinación de variables espaciales

Con el fin de destacar el importante papel de la disponibilidad de la tierra para los sistemas de producción agrícola, se analizó la relación de tres factores principales (y los elementos que los componen) y su influencia en la disponibilidad de la tierra. Tal como se resume a continuación:

- Uso de la tierra
 - Usos no modificables en el futuro.
 - Cuerpos de agua, tales como: lagos y ríos.
 - Áreas construidas, como: centros poblados e industrias.
 - Áreas protegidas.
 - Suelo estéril y playas.
 - Usos susceptibles a modificación en el futuro.
 - Cultivos de corto ciclo o diferentes a los perennes (Granos básicos, Hortaliza – ornamental, Hortaliza - ornamental con riego).
 - Pastizales.
 - Cultivos perennes (con duración de más de 2 años de vida).
 - Zonas de amortiguamiento.
 - Bosques.
- Accesibilidad (distancia a vías)
 - 0-500m.
 - 500-1500m.
 - > 1500m.

- Topografía
 - Altura.
 - Pendiente.
 - Orientación.

A continuación se explica con mayor detalle las variables que analizadas

➤ **Usos del suelo**

Se consideró el uso del suelo como el principal factor a tener en cuenta en la evaluación de la disponibilidad de la tierra. En esta categoría se incluyeron cuerpos de agua, áreas construidas, zonas protegidas, suelo estéril y playas, como áreas no-disponibles para la agricultura. Por lo tanto se determinó que la disponibilidad en esos casos debía ser cero porque no es un uso del suelo susceptible a cambios.

La razón de por la que se consideraron a las zonas protegidas como áreas no aptas para cultivar, se soportó en que se trata de un tema muy sensible para el medio ambiente. Este tema está regulado por la Ley de Áreas Protegidas y su decreto numero 4-89 (Congreso de la república de Guatemala, 1989), el cual establece las restricciones respectivas al uso de áreas de importancia ambiental y sus respectivas zonas de amortiguamiento (espaciamiento de conservación entre el área protegida y la de otros usos).

Por otro lado, las zonas cubiertas por usos del suelo tales como: cultivos de corto ciclo, pastizales, cultivos perennes, zonas de amortiguamiento y bosques; se clasificaron como zonas que podrían estar disponibles con un cambio en la utilización del terreno. La razón de esta decisión se soportó en que el tipo de restricción podría, en algún momento, permitir la siembra de un cultivo con un posible cambio en el uso de la tierra en el futuro. Sin embargo, no sería recomendable hacerlo en algunos casos, por ejemplo en el de bosques, pues se necesitaría una inversión importante de tiempo y dinero para cambiar los cultivos perennes por cultivos de corto ciclo, como lo es el brócoli.

Los bosques constituyen otro componente importante del medio ambiente. Encuestas realizadas por el CIAT a 120 productores de brócoli y arveja dulce del

altiplano guatemalteco, indicaron que muchos de ellos aún conservan una cantidad importante de bosque en sus fincas. Como se muestra a continuación:

Tabla 3: Área de bosque de los encuestados

Número de personas	Área (ha)
14	0.04 - 0.13
12	0.13 - 0.27
9	0.27 - 0.46
14	0.46 en adelante
Total de personas: 49	

Fuente: Elaboración propia, con base en encuestas CIAT

➤ Accesibilidad

El segundo elemento considerado para la evaluación de la disponibilidad de la tierra fue la distancia desde las parcelas hasta las vías más cercanas. Este componente representa una gran importancia para transportar los productos para el cuidado de la parcela y el transporte de la cosecha hasta el centro de acopio.

Para realizar esta valoración se tuvieron en cuenta nuevamente las encuestas mencionadas, gracias a las cuales se determinó que en la mayoría de los casos los productos eran transportados a través de caminos veredales y trochas. Los datos que permitieron hacer esta inferencia son los siguientes:

De 120 productores, 101 de ellos transportan sus productos usando su propia fuerza o con la ayuda de un animal destinado para ese fin. De los 101 productores, 75 tardan menos de una hora en realizar el recorrido, los 26 productores restantes tardan entre una a dos horas. Por lo tanto, se entiende que las distancias no son muy largas, pero sí suponen un gran esfuerzo para ser recorridas sino se dispone de vías cercanas o medios de transporte adecuados

Se establecieron entonces unos rangos de distancias teniendo en cuenta, además, la resolución de las coberturas que se usaron, que fueron de 30 arco-segundos (1km aproximadamente en el ecuador).

Se hicieron buffers o áreas de influencia con 3 valores distintos representando la distancia entre la cobertura de vías y el terreno circundante

➤ **Topografía**

A partir de las encuestas se pudo conocer el tipo de pendiente presente en el terreno de los productores. Los datos se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4: Tipo de topografía registrada en las encuestas

Número de personas	Tipo de terreno
29	Plano
48	Inclinado
29	Semi-inclinado
10	Plano e inclinado
3	Plano y semi-inclinado

Fuente: Elaboración propia

Pero además de la pendiente, se tuvo en cuenta la altura y la orientación respecto al sol. Para ello se usó el Modelo Digital de Elevación (MDE) de la Misión Topográfica de Radar (SRTM, por sus siglas en inglés), con resolución de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km en el ecuador).

Para la clasificación de los valores ideales de orientación y pendiente se usaron los mismos valores tanto para brócoli como la arveja. Y se hizo de la siguiente manera:

En cuanto a la pendiente, la reclasificación se hizo con base a los sitios que no superaron el 10%. Esto se hizo tomando como referencia estudios como el de Kleynhans & Vink (1998), en el cual se tiene en cuenta, entre otros parámetros,

una pendiente menor al 12% para clasificar la tierra como altamente potencial para ser cultivada.

Para la orientación, se dio preferencia a la orientación sur y sur-oriental. Esta clasificación se hizo teniendo en cuenta que la literatura se refiere a esta posición como un factor que puede favorecer de alguna manera el desarrollo de las plantas.

1.6.2 Ponderación de variables espaciales

Para determinar la disponibilidad de la zona para los cultivos de brócoli y arveja se establecieron las variables que restringían totalmente la posibilidad de cultivar, constituyéndose así el primer filtro del análisis de disponibilidad. Estas capas representaron la disponibilidad nula en los mapas finales.

Para el caso de los suelos que podrían en algún momento ser susceptibles a cambios, o que las restricciones eran de algún modo manejables, se elaboró la matriz de asignación de pesos a cada variable. La asignación de los valores se estableció mediante juicio de experto teniendo en cuenta las encuestas realizadas a los productores de la zona de estudio. Sin embargo, en este tipo de procesos es muy recomendable organizar talleres en los que se explique a la comunidad la metodología de asignación de pesos para que los participantes puedan expresar su punto de vista.

Para el análisis de las variables espaciales, se tuvieron en cuenta dos tipos de variables: las mutuamente excluyentes¹¹ y las que no lo son. Como ejemplos de las mutuamente excluyentes, se tienen los usos del suelo, puesto que para un sitio determinado no se pueden presentar dos usos al mismo tiempo. En este caso las variables fueron valoradas según el grado en el que permitían el crecimiento de los cultivos. En ese orden de ideas, un pastizal por ejemplo, permitiría en mayor medida la implementación de un cultivo frente a una zona protegida o un bosque.

En cambio las variables cuyos componentes no son mutuamente excluyentes, debieron ser analizadas de manera diferente. Por ejemplo la variable topografía, la cual tiene distintos valores de altura, pendiente y orientación en un mismo sitio. Para este caso fue necesario ponderar los componentes, es decir, asignar un peso

¹¹ La presencia de una de ellas impide que se presenten otras

de acuerdo al grado de importancia que tuvo cada variable para considerar un lugar como candidato. Esta misma situación se evidenció en la matriz final que representó la reunión de todas las variables del análisis (usos del suelo, topografía y acceso), dado que un mismo píxel posee las tres características a la vez: un uso del suelo determinado así como valores de altura y de distancia respecto a las vías.

1.6.2.1 Matriz de usos del suelo

Como se vio anteriormente (Tabla 1), los valores de la matriz de comparación por pares puede estar en el rango de $\frac{1}{9}$ hasta 9. Sin embargo, de acuerdo con la literatura consultada, los números pares y sus recíprocos, son usados rara vez, por ejemplo cuando hay un gran número de categorías o cuando la importancia de ellas no se puede diferenciar claramente

En este caso se trabajo con variables agrupadas en tres categorías únicamente, por esta razón se consideró suficiente con usar valores entre $\frac{1}{4}$ y 4 según la metodología planteada por Roa (2007), en la cual se eliminaron los valores intermedios pudiendo generar una matriz más simple. Ver Tabla 5.

Tabla 5: Valores usados para representar la importancia de las variables

1/4	1/3	1/2	1	2	3	4
Extrema baja	Muy baja	Baja	Igual	Alta	Muy alta	Extrema Alta

Fuente: Elaboración propia

La tabla que se presenta a continuación (Tabla 6), representa la matriz con los componentes de la variable usos del suelo con sus respectivos pesos. La primera columna está organizada de acuerdo al grado en el que el componente facilita la implementación de alguno de los cultivos de interés. Por lo tanto, se partió del supuesto de que algunas zonas se podrían cambiar de manera más fácil que otras, por ejemplo, en términos relativos las zonas que ahora mismo están destinadas al cultivo cualquiera, se podrían cambiar fácilmente por brócoli o arveja. Mientras que no pasaría lo mismo si se tratara de cambiar una zona de amortiguamiento o un bosque, por ejemplo.

Dado que los componentes de la variable “uso del suelo” son mutuamente excluyentes, cada uno de los valores de la columna “favorabilidad para cultivar”,

representa el grado en el que la cobertura de suelo de la misma fila permite establecer un cultivo, cualquiera que este sea.

Tabla 6: Matriz de la variable: usos del suelo

(j) <i>Uso suelo. RC = 0.0906</i>	Cultivos corto ciclo					Promedio $\sum x_{jj}/n$	($\sum x_{jj} / n$) / ($\sum x_j$) (favorabilidad para cultivar)
(x)							
Cultivos corto ciclo	1	4	4	4	4	3.4	0.411
Pastizales	1/4	1	4	2	4	2.25	0.272
cultivos perennes	1/4	1/4	1	2	3	1.30	0.157
zonas amortiguamiento	1/4	1/2	1/2	1	2	0.85	0.103
Bosques	1/4	1/4	1/3	1/2	1	0.47	0.056
					$\sum x_j$	8.27	1

Fuente: Elaboración propia

La matriz de la tabla anterior, parte de la formula $\sum x_{jj}/n$.

Donde:

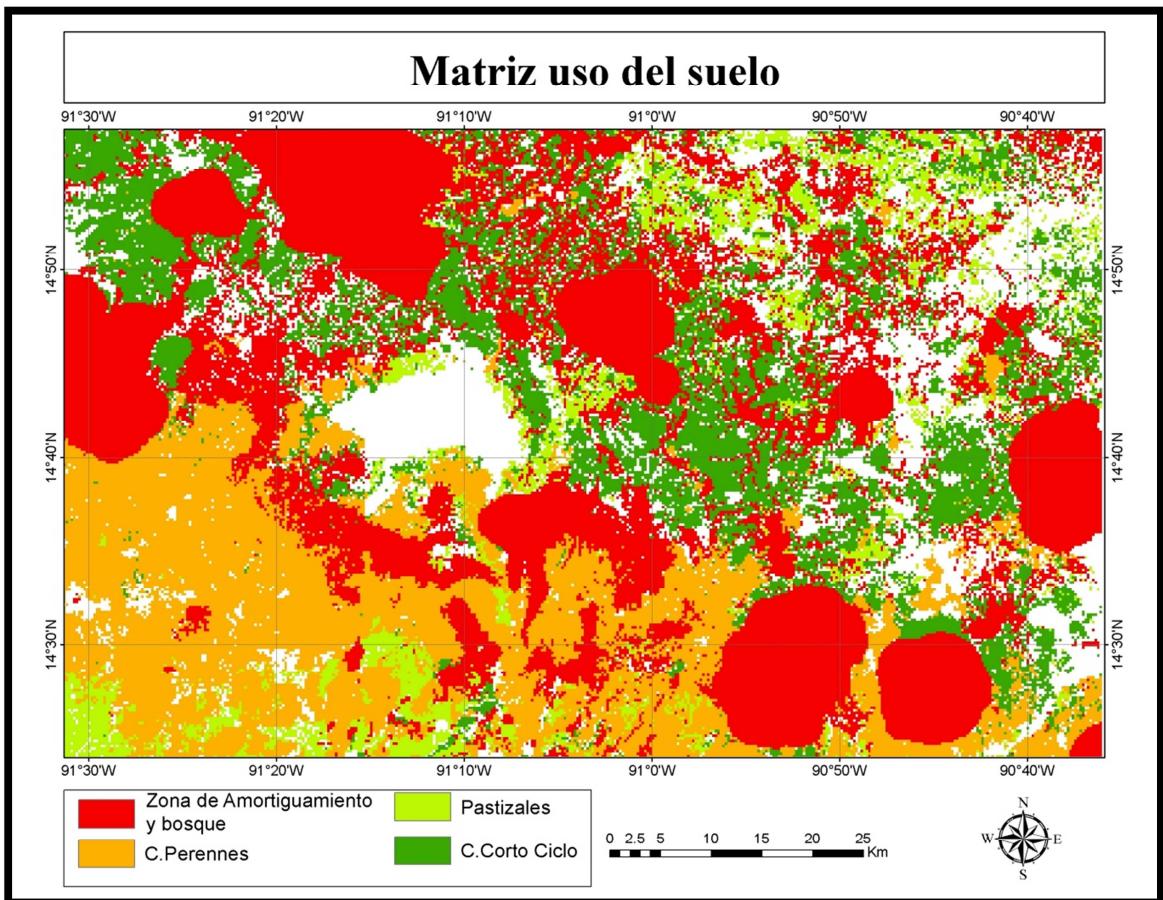
$\sum x_{jj}$: sumatoria de las casillas horizontales de cada una de las variables.

n : representa el número de variables, en este caso es 5

Una vez formada la matriz, se evaluó el ratio de consistencia (CR, según las formulas de la página 22), el cual tuvo el valor de 0.0906, después de realizar los ajustes respectivos. Por tal razón la consistencia de la matriz se considera aceptable teniendo en cuenta que el umbral es CR = 0.10.

Como resultado de la matriz de la Tabla 6 se generó el mapa se la Figura 6, el cual ha sido generado teniendo en cuenta el grado en que cada uso del suelo favorece la posibilidad de establecer un cultivo.

Figura 6: Resultado de la matriz de usos del suelo



Fuente: Elaboración propia

En el mapa anterior, los colores representan los diferentes usos del suelo, pero además, el nivel en el que cada uno de estos usos posibilita el establecimiento de un cultivo. En esa medida, y acorde con los valores de la Tabla 6, las zonas de color rojo tienen valores muy bajos de favorabilidad para implementar algún cultivo. El color naranja representa una restricción menor que la roja, pero que representa un uso del suelo complicado para establecer nuevos cultivos como el brócoli o la arveja puesto que el suelo ya se encuentra ocupado por cultivos perennes. El color verde claro, representa valores más favorables que los

anteriores usos vistos. Y finalmente las zonas que de color verde oscuro representan los más altos valores en la matriz de ponderación correspondiente.

1.6.2.2 Matriz de topografía

Para la variable topografía, al igual que para la distancia, se hizo la reclasificación de cada componente de la variable según los valores y características apropiadas para el propósito que se buscaba (de forma similar al estudio realizado por Frau, Valenzuela & ORMAZABAL ROJAS [2006]). Teniendo en cuenta, como se ha mencionado anteriormente, que las variables altura, pendiente y orientación no son mutuamente excluyentes; el ponderado representa la importancia de cada variable para determinar la factibilidad de cultivar en la zona.

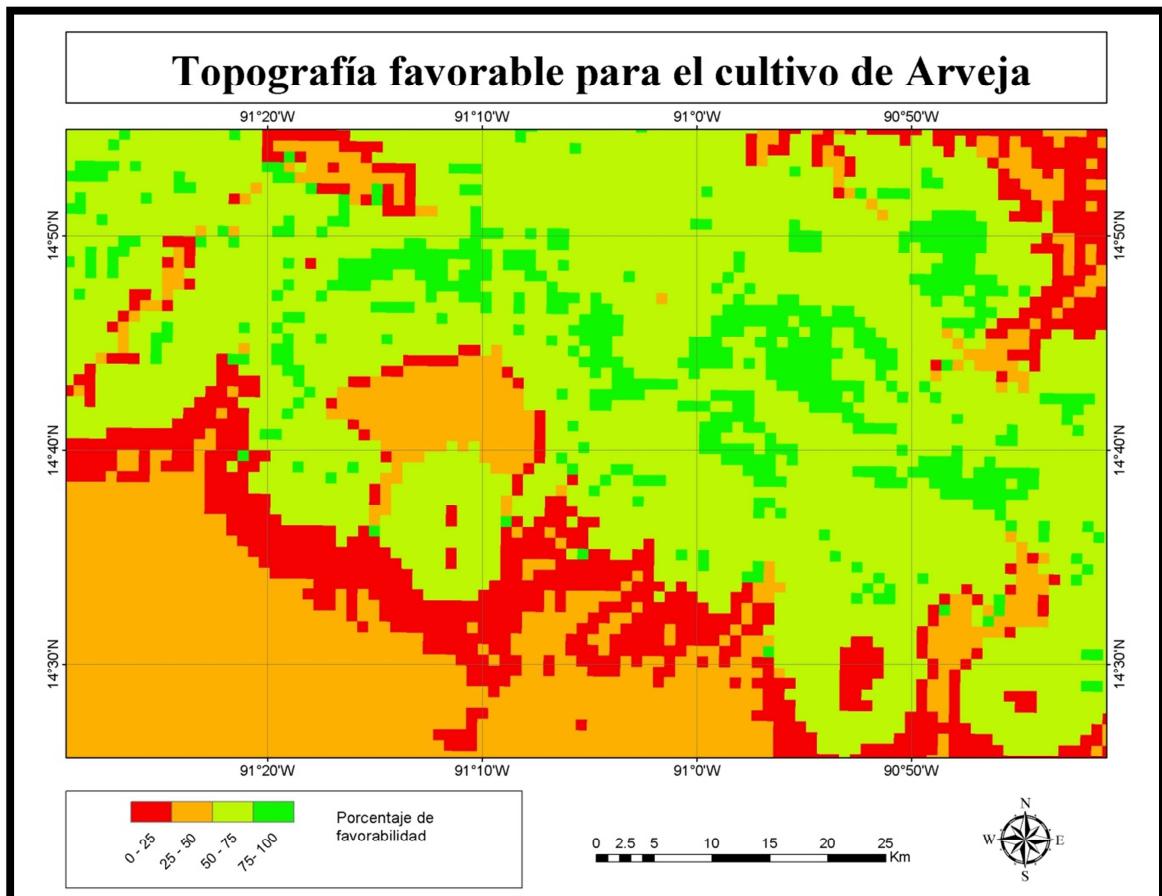
Tabla 7: Matriz de la variable topografía

<i>Distancia. RC = 0.0516</i>	Altura	Pendiente	Orientación	$(\sum x_{jj} / n) / (\sum x_j)$ (importancia de la variable)
Altura	1	3	4	0.54
Pendiente	1/3	1	4	0.36
Orientación	¼	¼	1	0.10

Fuente: Elaboración propia

La matriz anterior generó los mismos pesos tanto para brócoli como para arveja, sin embargo los rangos de altura ideales para cada cultivo son diferentes. Por esta razón los dos mapas que resultantes son distintos, pero una vez aplicada a la información ráster, produjo resultados diferentes. Ver Figura 7 y Figura 8.

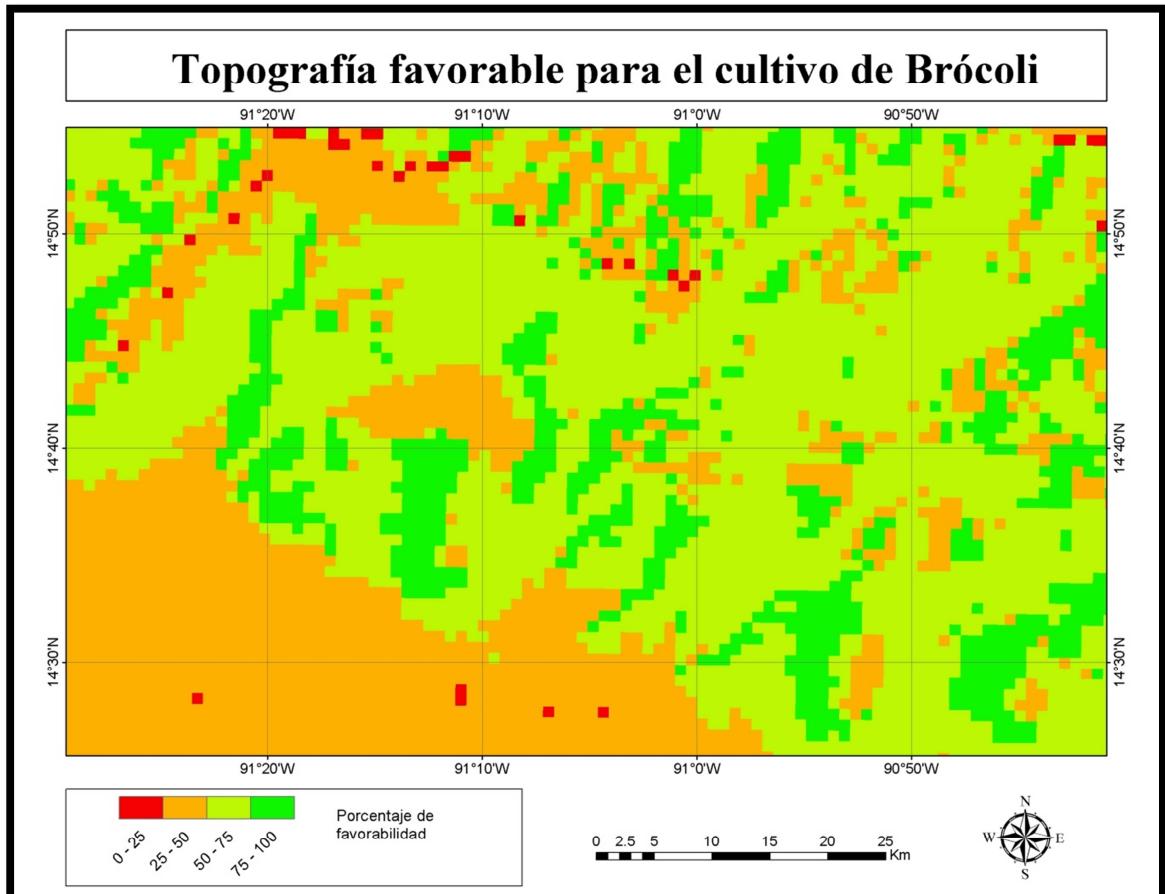
Figura 7: Mapa con los valores ponderados de topografía para arveja



Fuente: Elaboración propia

Los valores del mapa muestran el porcentaje de favorabilidad según las condiciones de altura, pendiente y orientación respecto al sol. Los valores no empiezan en cero debido a que a la altura poco apropiada se le dio valores bajos en la ponderación, más no valores nulos.

Figura 8: Mapa con los valores ponderados de topografía para brócoli



Fuente: Elaboración propia

Los valores de los dos mapas anteriores, representan el porcentaje de de cada sitio para cada uno de los cultivos, en color rojo se pueden observar los valores más bajos, estos se generan por la combinación de características poco beneficiosas para el crecimiento de los cultivos. Por el contrario, la tonalidad verde representa la combinación de características favorables, sin embargo dado que en la matriz correspondiente (ver Tabla 7), la altura es la que posee mayor peso, es de esperarse que los valores altos en este mapa se deban principalmente a esa razón.

1.6.2.3 Matriz distancia

Para el caso del acceso, se partió del siguiente supuesto: a medida que la distancia a recorrer disminuye, hay mejor acceso y los terrenos ubicados en el área circundante tienen mayor valor en términos de su aptitud para favorecer, no solo la siembra del cultivo, sino también su transporte. El mapa correspondiente es idéntico en apariencia al mapa de distribución de la distancia de la Figura 15.

Tabla 8: Matriz de la variable: Distancia

<i>Distancia. RC = 0.0516</i>	< 500	500-1500	> 1500	$(\sum x_{jj} / n) / (\sum x_{ij})$ (favorabilidad para cultivar)
< 500	1	2	4	0.500
500-1500	$\frac{1}{2}$	1	4	0.359
> 1500	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	1	0.101

Fuente: Elaboración propia

1.6.2.4 Matriz para la ponderación de todas las variables unidas

Las tres matrices anteriores permitieron definir nuevos valores a las capas ráster que representaron las variables de análisis. Posteriormente, se elaboró una nueva matriz compuesta por valores de importancia relativa. Al igual que en los casos anteriores, varió entre $\frac{1}{4}$ y 4.

Tabla 9: Matriz de la totalidad de las variables

<i>Variables. RC=0.0706</i>	Uso suelo	Topografía	Distancia a vías	$(\sum x_{jj} / n) / (\sum x_{ij})$ (importancia de la variable)
Uso suelo	1	3	4	0.58
Topografía	$\frac{1}{3}$	1	3	0.31
Distancia a vías	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	1	0.11

Fuente: Elaboración propia

Los pesos en este caso fueron asignados según la importancia de las variables. En primer lugar y con la mayor importancia se ubicó el uso del suelo, esto se debió a que está compuesto por algunos elementos que pueden causar gran restricción tal como se mostró en la matriz de para usos del suelo (Tabla 6).

En segundo lugar se ubicó la topografía como una de las variables más importantes para la influencia en el clima y, por supuesto, en la dificultad para la siembra, según el grado de pendiente del terreno.

En tercer lugar de importancia se tomó la variable de distancia a vías puesto que cuando ésta es muy grande, los tiempos de recorrido pueden ser mayores, influyendo así en la calidad del producto que se entrega al consumidor. Sin embargo no es una variable tan radical como para imposibilitar sembrar un cultivo, al menos no en la región de estudio.

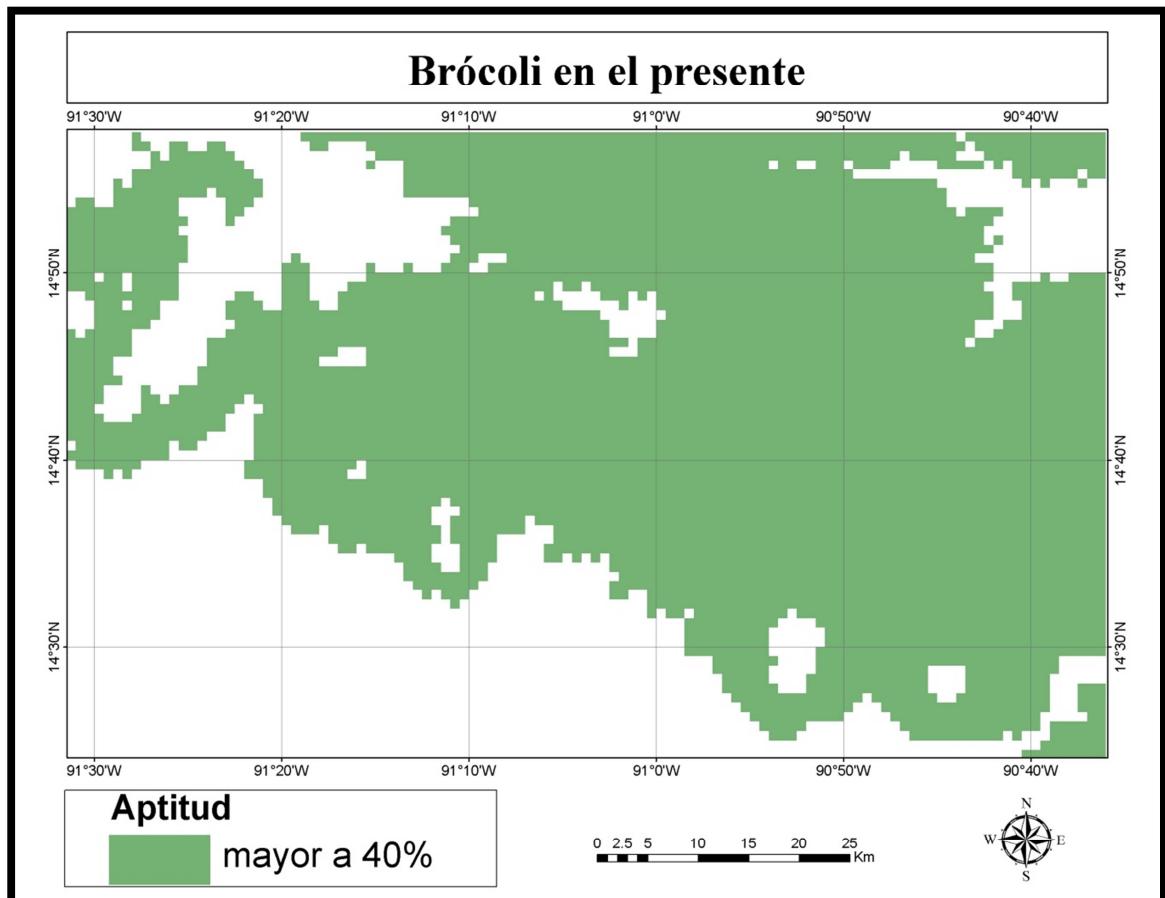
1.6.3 Cruce de restricciones espaciales e información de AC.

Para este caso se usó la información de AC integrando además la información de disponibilidad de la tierra. La intersección de estos mapas permitió conocer las áreas con mejor AC y a la vez con menor restricción espacial para el crecimiento de los cultivos de interés.

Para realizar el análisis de los resultados de las modelaciones de aptitud al clima, se estableció un umbral del 40%, rango que está de acuerdo con anteriores estudios realizados por el CIAT, considerando estas zonas en el rango de buena a excelente AC, convirtiéndose así en lugares de alto interés para sembrar.

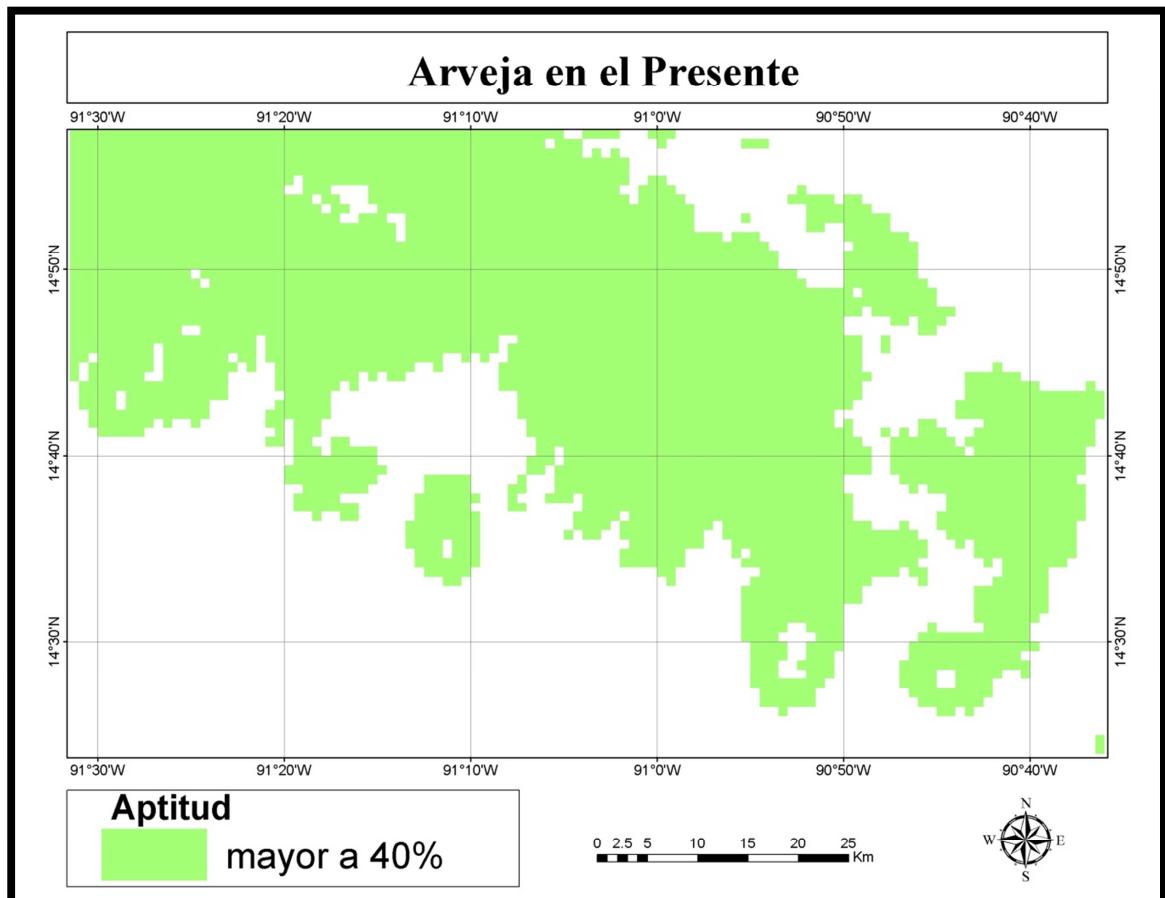
Los mapas de las figuras que se muestran a continuación (Figura 9 y Figura 10) representan las zonas que en el presente tienen aptitud climática superior a 40%. Esas mismas zonas se analizaron en el futuro para conocer la forma como cambiarían, tanto en AC como el número de hectáreas.

Figura 9: Aptitud mayor a 40% en el presente para brócoli



Fuente: Elaboración propia con base a los resultados de AC del CIAT

Figura 10: Aptitud mayor a 40% en el presente para arveja



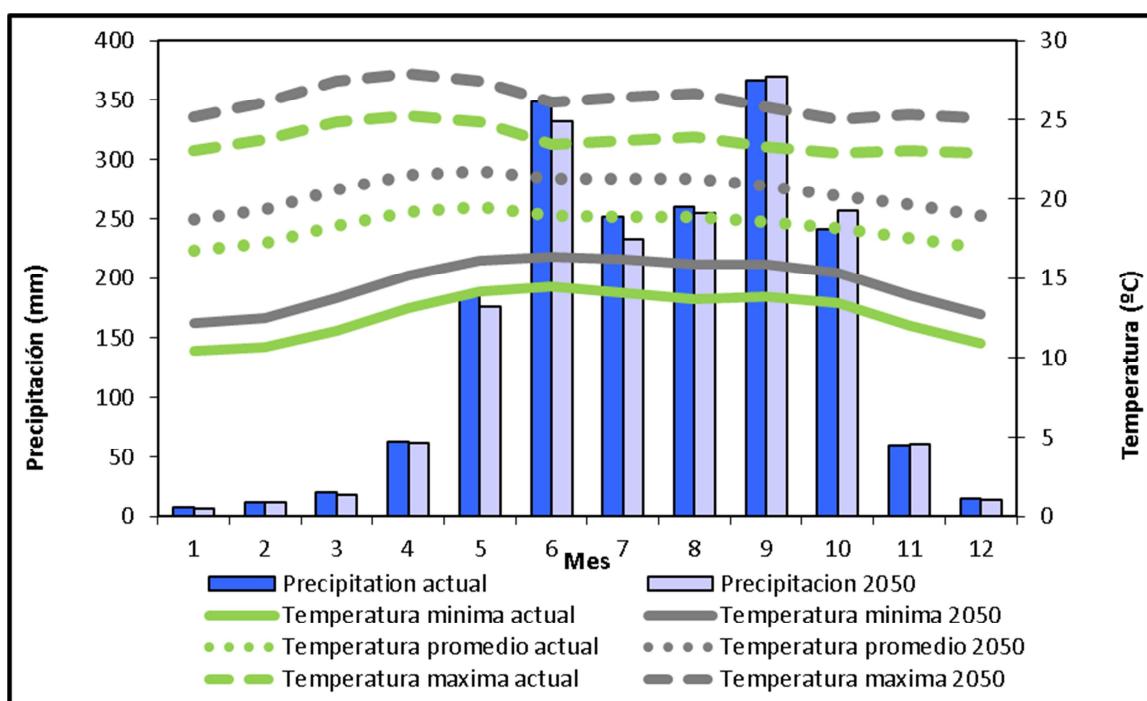
Fuente: Elaboración propia con base a los resultados de AC del CIAT

4. RESULTADOS

1.7 CLIMA ACTUAL DE LA ZONA, Y PROYECCIÓN HACIA EL FUTURO (2050)

La información climática fue extraída o cortada usando una máscara de la zona de estudio, luego se hizo el correspondiente control de la consistencia de los datos para identificar errores que debieran ser resueltos. Posteriormente se analizó el comportamiento del clima con técnicas que el CIAT ha establecido. Los resultados indican que hasta el 2050 la temperatura anual aumentaría 2,2°C. En promedio. Además la temperatura máxima del año aumentaría 2.6°C. La temperatura mínima del año se incrementaría 1.7°C. Además, al año 2050, la precipitación anual disminuiría 33 milímetros.

Figura 11: Proyección del comportamiento de la temperatura y la precipitación al el año 2050



Fuente: Elaboración propia

En la anterior (Figura 11), se puede ver el clima proyectado para el año 2050 (2040-2069), en comparación con el promedio del clima del presente (1960-1990 de WorldClim). Los datos sobre el clima futuro se derivaron de 19 MCG del cuarto

reporte de evaluación del IPCC (2007), pertenecen al escenario "A2" (sin eventos extraordinarios a futuro). Para más información consultar las páginas web: <http://www.ipcc-data.org> y <http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPPage>

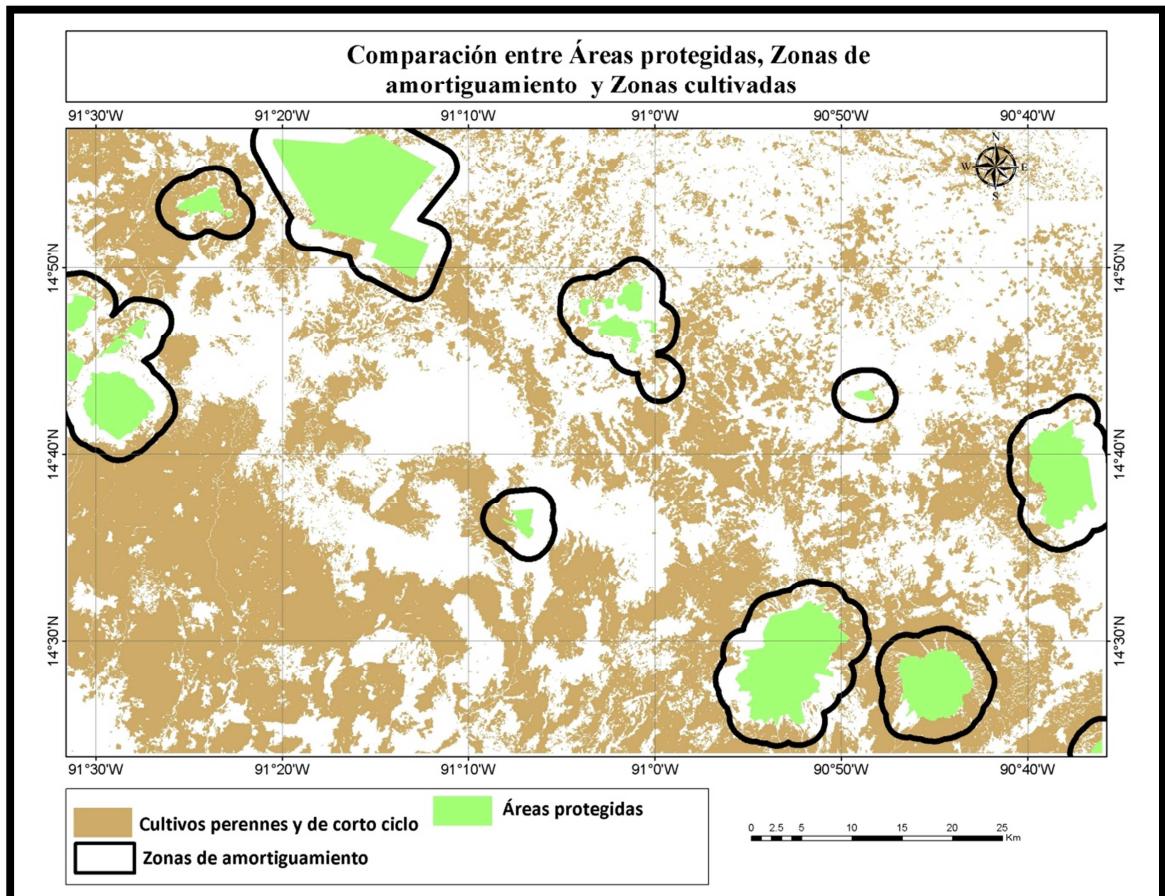
1.8 RESTRICCIONES ESPACIALES EN LA ACTUALIDAD

1.8.1 Comparación de áreas protegidas y zonas cultivadas

Para este proyecto se definieron las zonas de amortiguamiento con una distancia de 2 km a la redonda. Autores como March I. & A. Flamenco (1996), establecen una distancia variable entre 5 y 10 km. Sin embargo, en nuestro caso no tenía sentido hacerlo con distancia superior a 2km debido a que, como puede observarse en el mapa de la

Figura 12, las zonas cultivadas han sobrepasado el límite de la zona de amortiguamiento, e incluso se observa que algunas zonas de importancia ambiental limitan directamente con los cultivos, lo cual podría causar problemas, tanto al medio ambiente como a los mismos cultivos. Una de las razones es la posible presencia de animales que son desplazados de su habitad natural.

Figura 12: Áreas protegidas, zonas de amortiguamiento y áreas a de cultivo



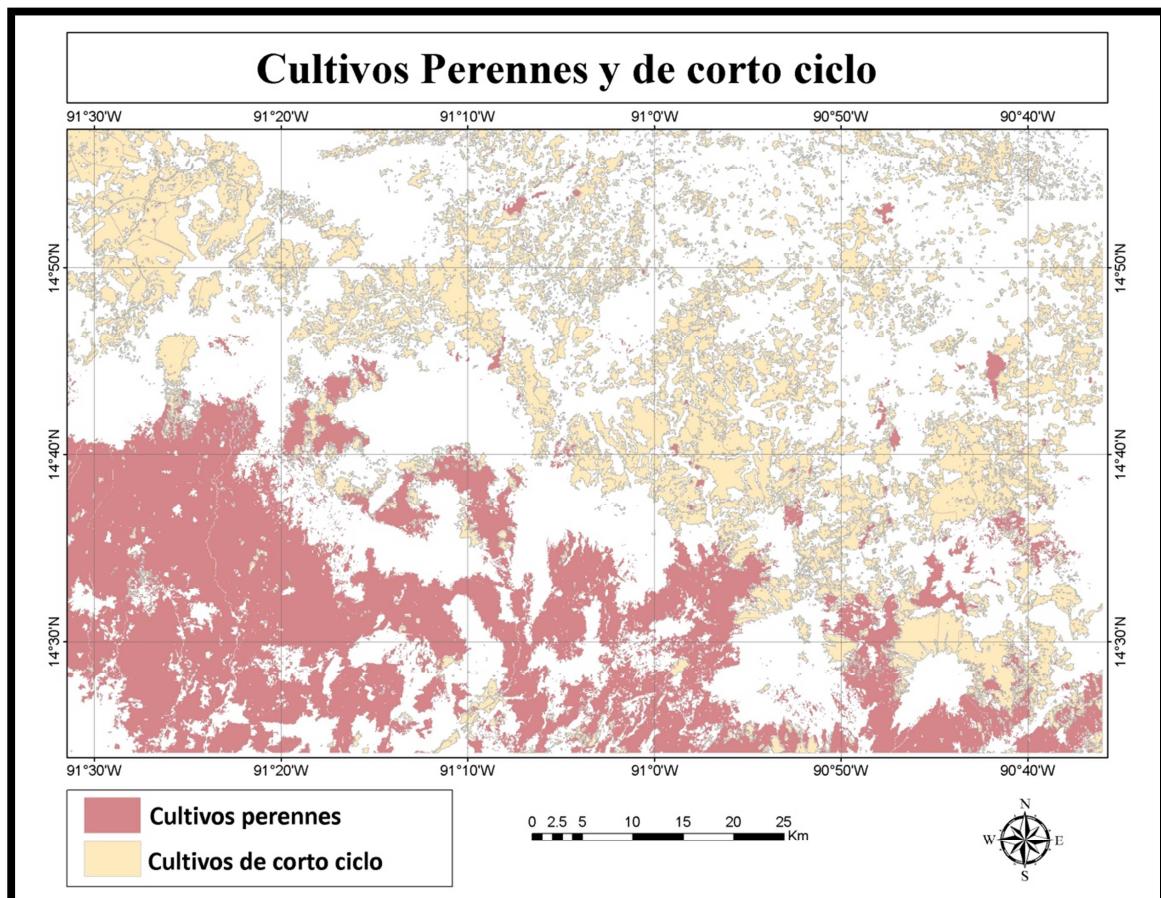
Fuente: Elaboración propia

1.8.2 Comparación entre cultivos perennes y cultivos de corto ciclo

A partir de la base de datos del CIAT, clasificaron los cultivos perennes de la zona de estudio, típicamente, el café es un muy buen ejemplo de un cultivo perenne. Sin embargo, para este caso, las encuestas realizadas no registraron ningún cultivo perenne. Únicamente está la arveja que es una planta anual, más no perenne, y el brócoli. Ambos cultivos se sitúan como los más importantes en la región de estudio. Según la base de datos del CIAT en el sitio hay presencia de los siguientes cultivos: aguacate, cacao, café, caña de azúcar, cítricos, frutales deciduos, hule, mango, papaya, piña, otros frutales.

A continuación (Figura 13) se muestra el mapa de contraste de los cultivos perennes y otro tipo de cultivos que en su mayoría son de corto ciclo.

Figura 13: Cultivos perennes y de corto ciclo

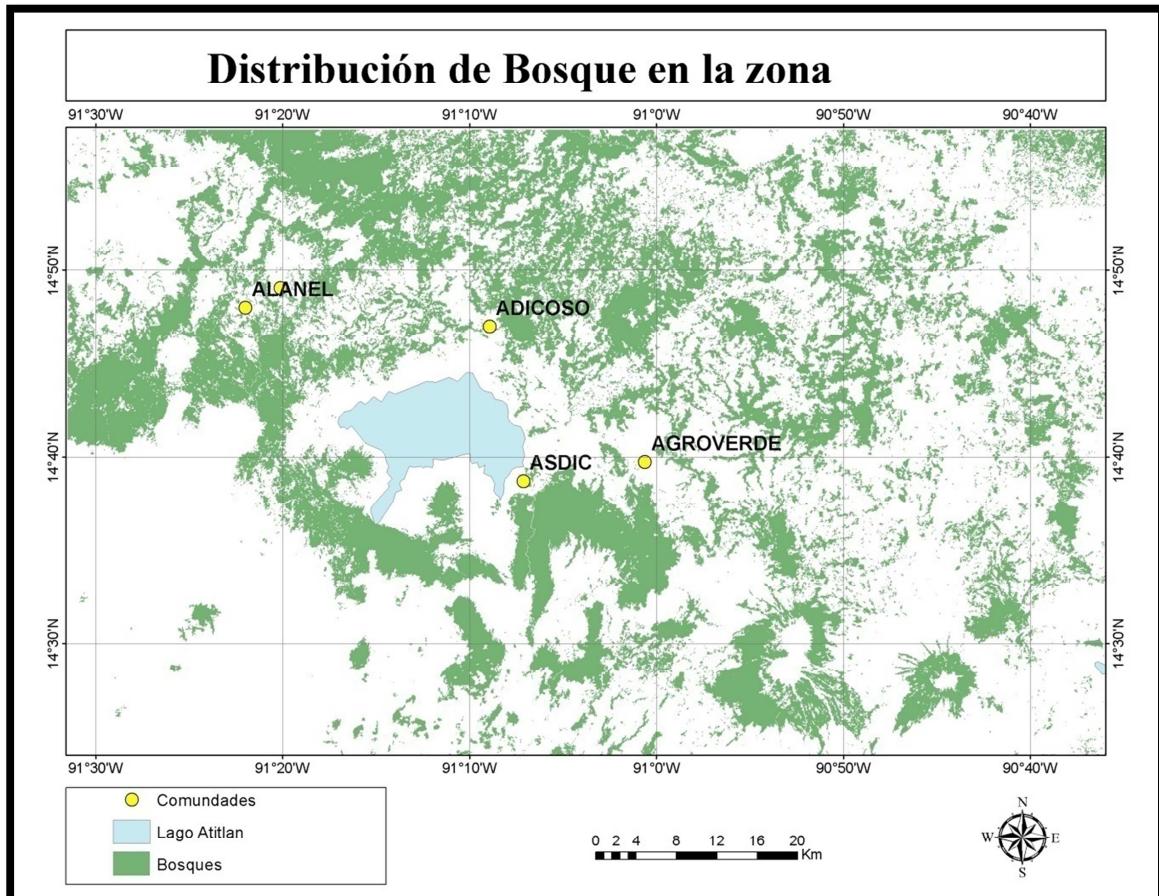


Fuente: Elaboración propia

1.8.3 Distribución de los bosques en la zona de estudio

En este caso en las encuestas no se menciona el tipo de bosque presente en la región, así que para el análisis se elaboró una cobertura que agrupó en una misma clase todos los tipos de bosque encontrados en la base de datos de CIAT. Entre los tipos de bosque agrupados están: bosque conífero, bosque latifoliado, bosque mixto y plantación conífera. Ver Figura 14.

Figura 14: Distribución de bosques en del altiplano guatemalteco



Fuente: Elaboración propia

1.8.4 Accesibilidad

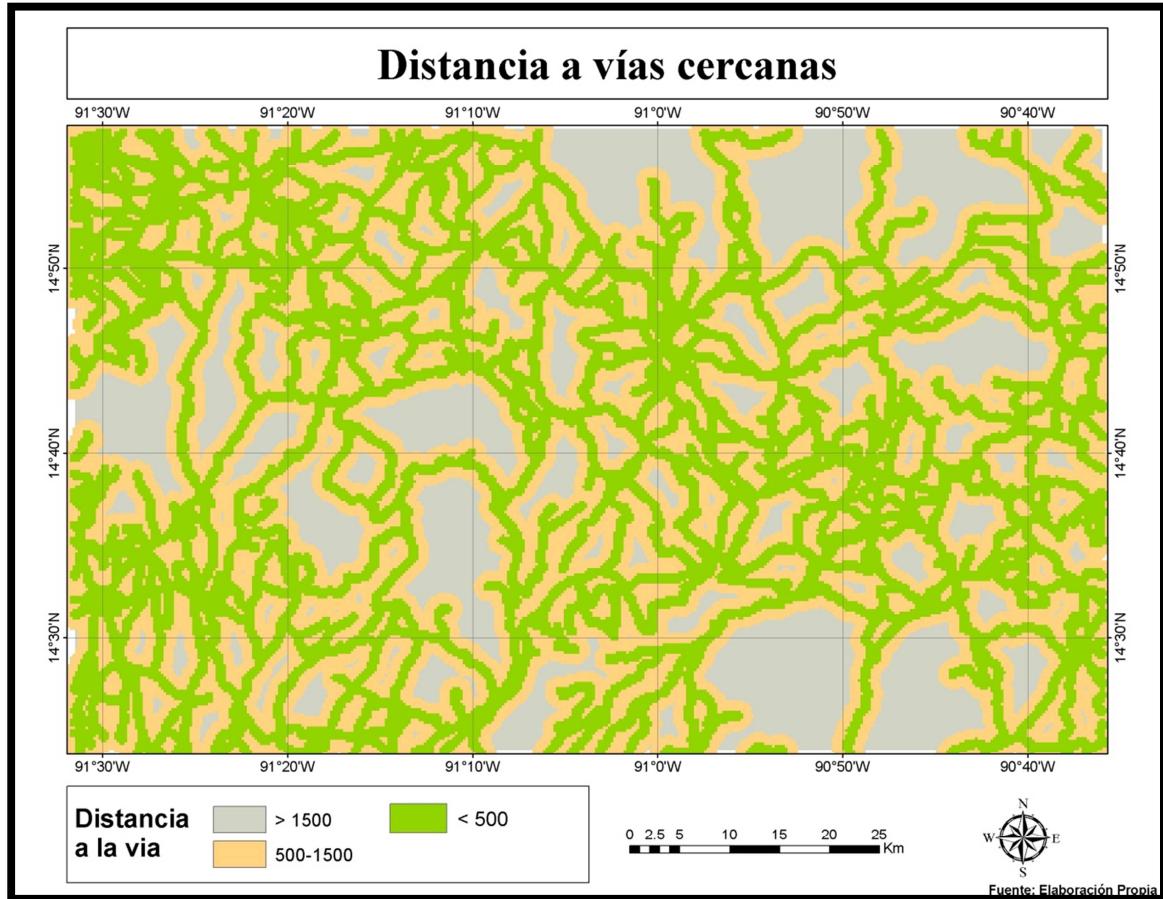
Para el análisis se establecieron los siguientes rangos de distancia los rangos de distancia son los siguientes:

Distancia < 500m, terreno accesible (Color verde en el mapa).

500 < Distancia < 1500m, accesible con mayor esfuerzo (Color naranja).

Distancia > 1500m, acceso muy costoso (Color gris).

Figura 15: Distancia a vías cercanas



Fuente: Elaboración propia

El mapa anterior indica que a medida que la distancia entre cada sitio y la vía es mayor, el esfuerzo o costo de acceso también se incrementa. Ahora bien, tal como lo señalan los autores de un estudio realizado en Uganda (Pender, Jagger, Nkonya, & Sserunkuma, 2001), el mejoramiento del acceso a través de carreteras parece estimular la expansión de las áreas agrícolas en perjuicio de las áreas de bosque natural y humedales. Por lo tanto, en el caso específico de Guatemala, si se van a explorar alternativas para los agricultores, es necesario tener en cuenta el componente ambiental para no causar detrimento del mismo.

1.8.5 Topografía

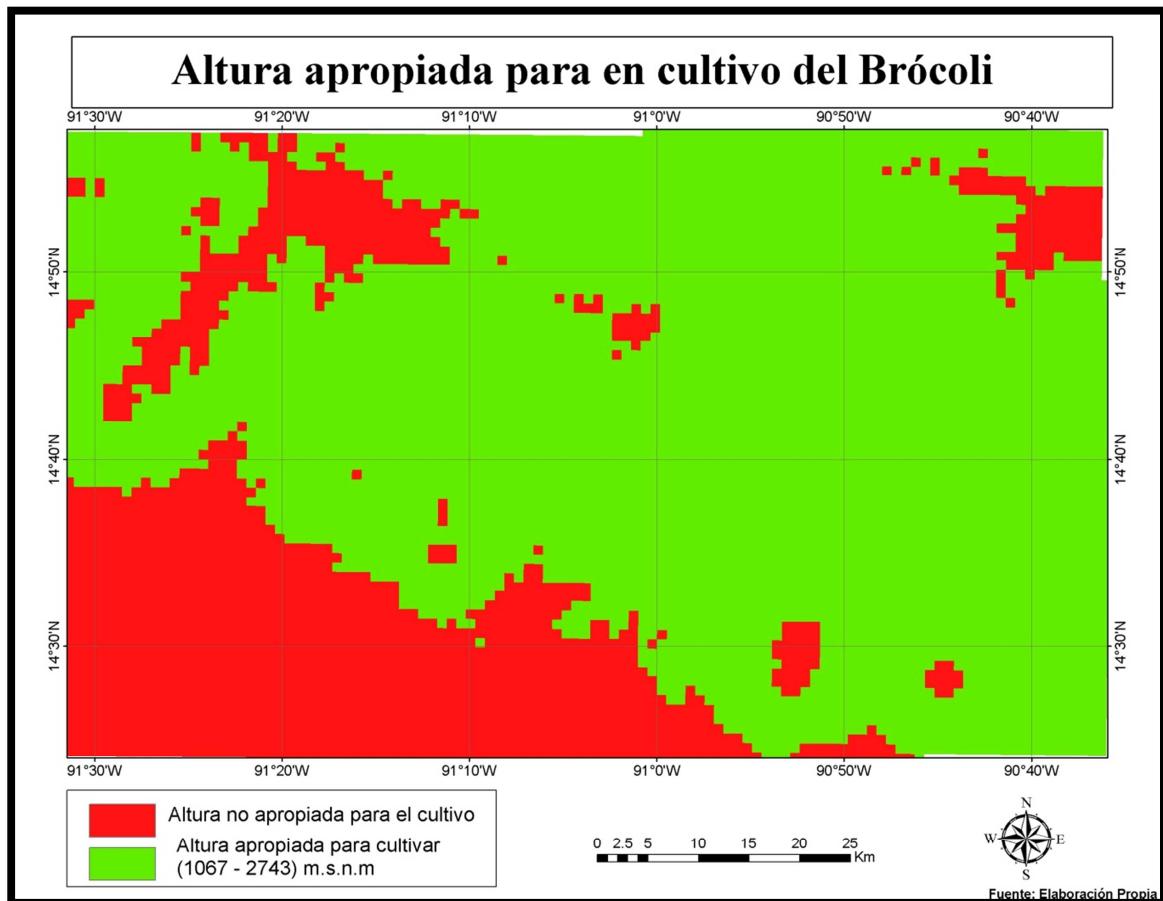
Se establecieron los rangos de altura en los cuales cada cultivo se desarrolla bien, según la literatura consultada son los siguientes:

Arveja 1.600 – 3.000 msnm (CIAT, 2010).

Brócoli 1.067 – 2.743 msnm (CUC, 2009).

De las variables derivadas del MDE, la única que se clasificó de forma diferente para los cultivos analizados fue la altura. Esto se debe a que los requerimientos son diferentes dependiendo del tipo del cultivo

Figura 16: Altura apropiada para brócoli



Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Altura apropiada para arveja



Fuente: Elaboración propia

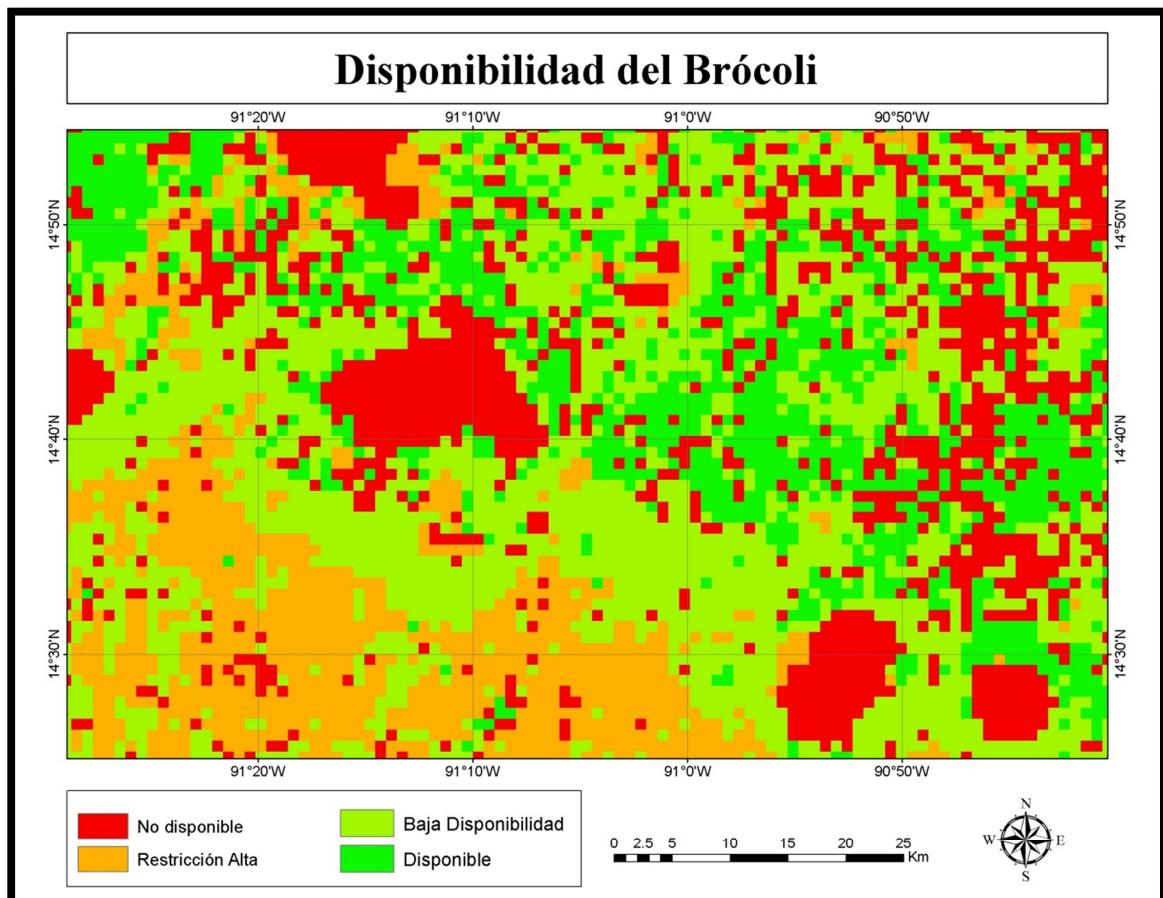
1.8.6 Ponderación de todas las variables

Los valores de las diferentes matrices permitieron realizar los mapas de las Figura 18 y Figura 19, los cuales representan toda la zona de estudio sin importar el tipo de aptitud climática. Cabe aclarar que no se realizó superposición ponderada para combinar las capas de aptitud climática y de restricciones espaciales. Más bien se unió esta información buscando los valores más altos de favorabilidad tanto de AC como de restricciones espaciales.

En los mapas se incluye además las zonas donde no se puede establecer cultivo alguno. Para ello se tuvo en cuenta los valores de ponderación de la matriz de la Tabla 9.

1.8.6.1 Resultados para brócoli

Figura 18: Disponibilidad para brócoli



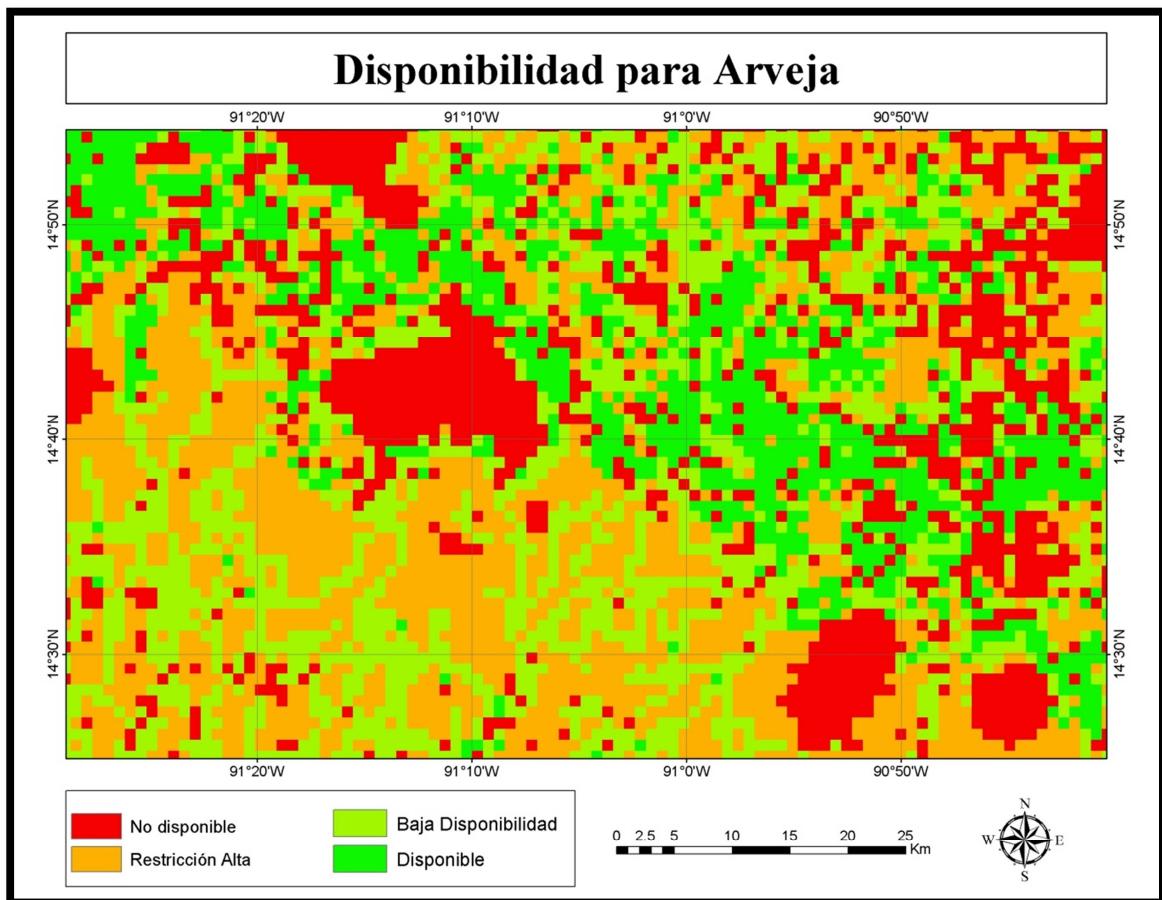
Fuente: Elaboración propia

Al contrastar el mapa final de disponibilidad de la tierra para cultivar brócoli con los mapas de usos del suelo, se pudo notar que buena parte del área con restricción alta, se debe a que el suelo se encuentra ocupado por cultivos perennes de pisos térmicos distintos a los apropiados para el brócoli. Esto se puede notar más que todo en la zona sur-oeste de casi todos los mapas que se han venido generando.

Además, las zonas etiquetadas como áreas de baja disponibilidad, en gran parte están ocupadas por bosque.

1.8.6.2 Resultados para arveja

Figura 19: Disponibilidad para Arveja



Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la arveja, la disponibilidad se distribuyó de forma diferente, especialmente en las zonas etiquetadas con restricción alta y las zonas de baja disponibilidad. Esto se presentó como consecuencia de que el rango de altura apropiado sufrió cierta variación. De acuerdo con las tablas de asignación de pesos, el elemento altura de la variable topografía tuvo un peso alto después de la variable uso del suelo.

1.9 DISPONIBILIDAD SEGÚN RESTRICCIONES ESPACIALES Y AC

1.9.1 Cuantificación del porcentaje de la AC en el año 2050 de las zonas que en la actualidad tienen AC mayor al 40%

1.9.1.1 Brócoli

Tanto en el caso de brócoli como en el de arveja dulce, la AC promedio no llegaría a estar por debajo del 40%, esto podría indicar que no existe un porcentaje importante de perdida. Sin embargo, por tratarse de un promedio hecho con muchos pixeles, pudo haber compensación entre los valores de éstos. Por lo tanto, se aplicó otro procedimiento para analizar el posible cambio de AC. Este se enfocó en el área de las zonas de interés (con AC mayor a 40%). El cual se explica a continuación.

Inicialmente se identificaron las zonas que en las condiciones actuales presentaron AC superior al 40%. Luego se determinó el promedio de AC de las mismas zonas en el futuro. De esta manera se conoció la variación de la AC en los lugares que en la actualidad tienen buenas condiciones para el establecimiento del cultivo.

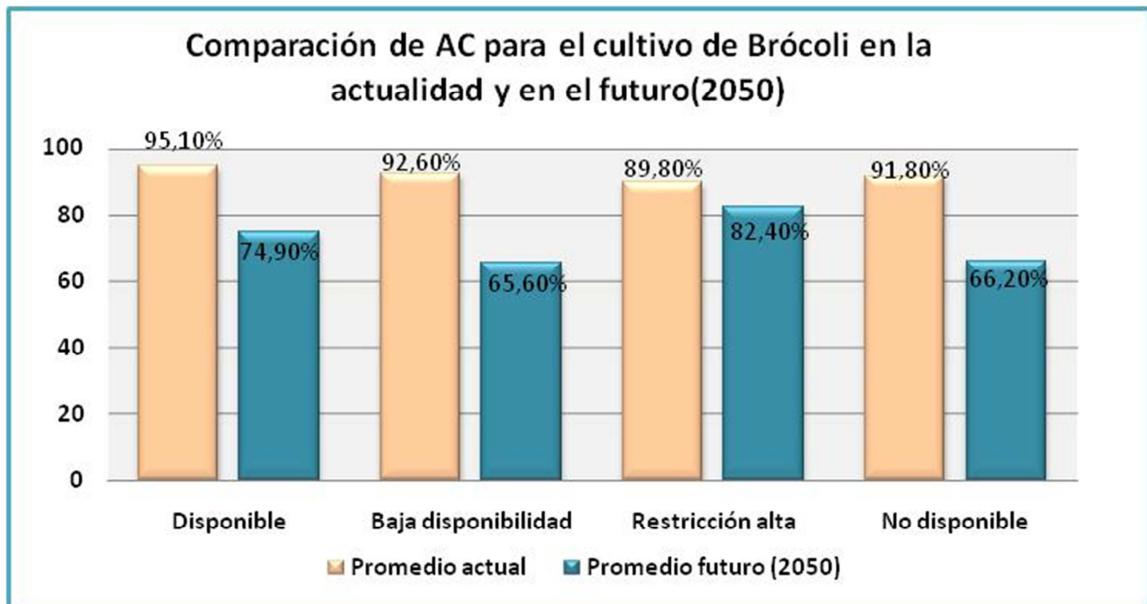
Tabla 10: Porcentaje de AC vs. disponibilidad para brócoli en el 2050

Brócoli		
Tipo de restricción	presente	futuro 2050
Disponible	95.1	74.9
Baja disponibilidad	92.6	65.6
restricción alta	89.8	82.4
no disponible	91.8	66.2

Fuente: Elaboración propia

Tal como se observa en la siguiente anterior, el promedio de aptitud para brócoli disminuiría con el paso del tiempo. Sin embargo, en ningún caso la AC promedio estaría por debajo del umbral del 40%, el cual fue establecido como el mínimo valor en el cual la zona puede ser interesante para la posible implementación de un cultivo

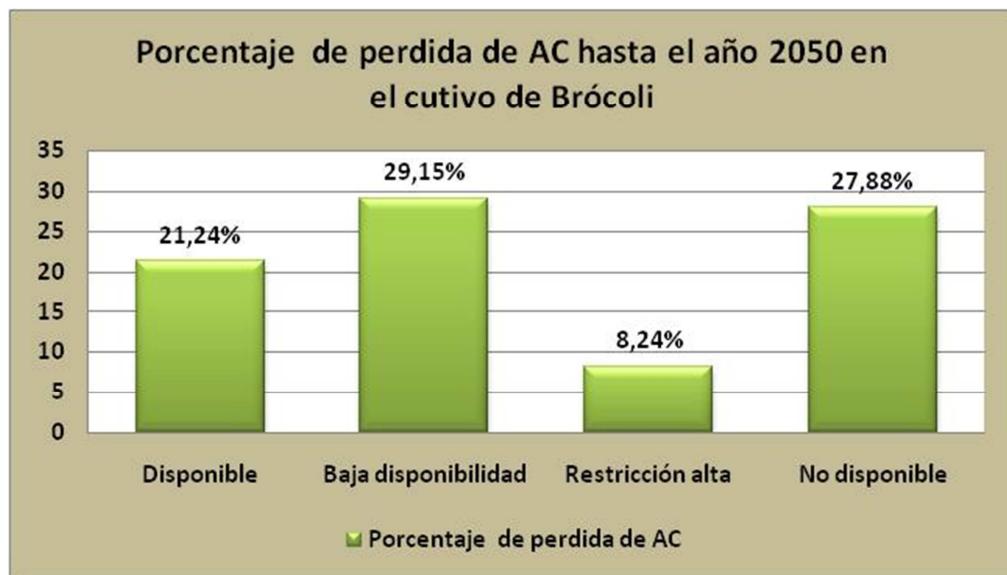
Figura 20: Comparación de AC actual y futura para Brócoli



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el área disponible para el cultivo, es decir, la que presenta menor restricción de todas, no es significativa con relación a los demás tipos de restricción. Al realizar la intersección de estos nuevos mapas con los existentes de aptitud respecto al clima, el área apropiada para el establecimiento del cultivo se redujo considerablemente.

Figura 21 Porcentaje de pérdida de AC para el cultivo del brócoli



Fuente: Elaboración propia

1.9.1.2 Arveja

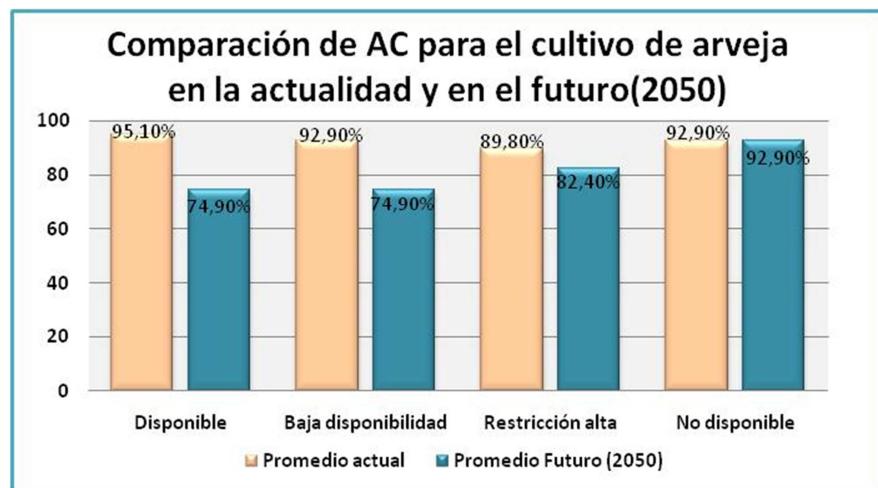
Tabla 11: Porcentaje de AC vs. disponibilidad para arveja en el 2050

Arveja		
Tipo de restricción	presente	futuro 2050
Disponible	95.1	74.9
Baja disponibilidad	92.9	74.9
restricción alta	89.8	82.4
no disponible	92.9	92.9

Fuente: Elaboración propia

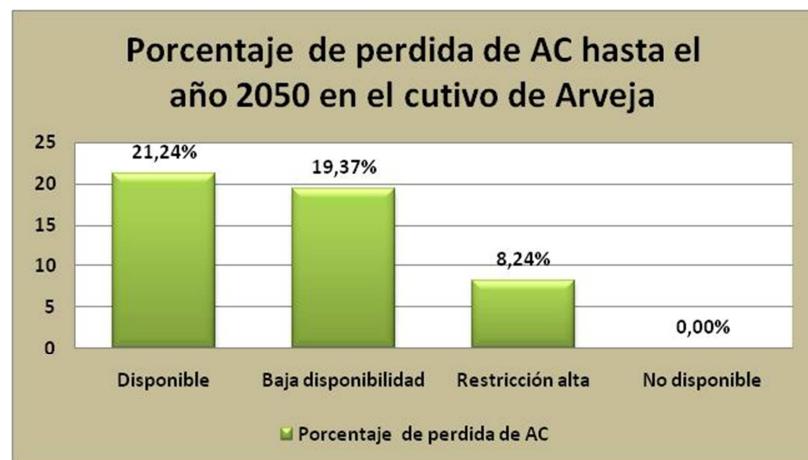
En la tabla anterior se puede ver también que el promedio general para arveja seguiría conservando valores altos

Figura 22 Comparación de AC actual y futura para Arveja



Fuente: Elaboración propia

Figura 23 Porcentaje pérdida de AC para el cultivo de Arveja



Fuente: Elaboración propia

Tal como se observa en la gráfica anterior, el terreno con buena disponibilidad para cultivar, disminuiría de forma considerable, esto se podría deber a una mayor susceptibilidad a los cambios del clima que podrían ocurrir hasta el año 2050.

1.9.2 Cuantificación del área de las zonas que tendrían AC mayor al 40% ahora y en el 2050

Otra de las preguntas que permitió analizar mejor la zona de interés fue: ¿cuántas hectáreas conservarían una AC superior al 40% en el año 2050?)

Es decir, se identificaron las zonas que tanto en el presente como en el futuro (año 2050) tendrían AC en el rango de buena a excelente (> 40%), y de esa manera se conoció el área que seguirá conservando buena aptitud.

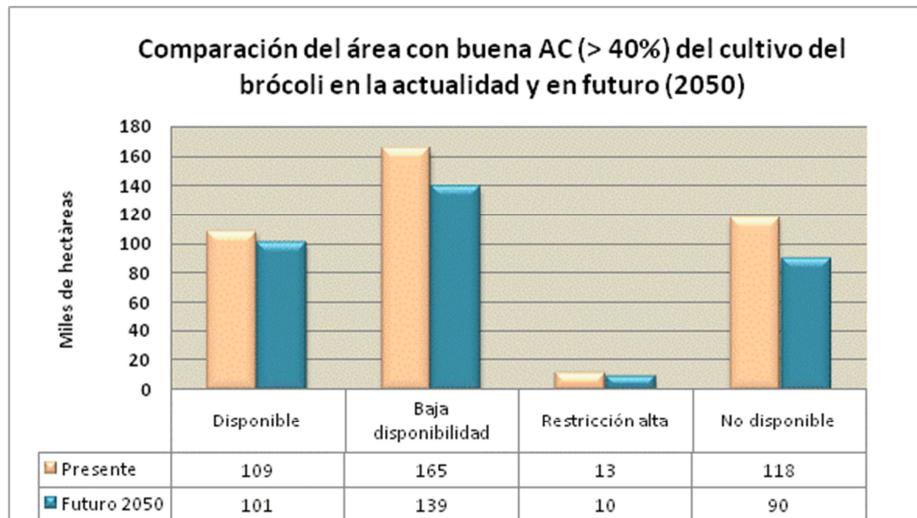
1.9.2.1 Brócoli

Tabla 12: Área de las zonas con buena aptitud para brócoli en el futuro

Tipo de restricción	Brócoli hectáreas en miles		
	presente	futuro 2030	futuro 2050
Disponible	109	104	101
Baja disponibilidad	165	149	139
restricción alta	13	12	10
no disponible	118	97	90

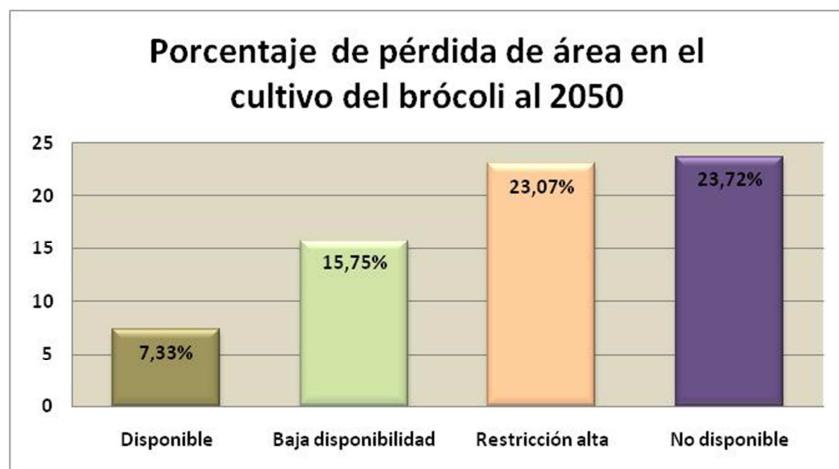
Fuente: Elaboración propia

Figura 24 Comparación del área con buena AC para brócoli en la actualidad y en el año 2050



Fuente: Elaboración propia

Figura 25: porcentaje de pérdida de área apta para brócoli hasta el año 2050



Fuente: Elaboración propia

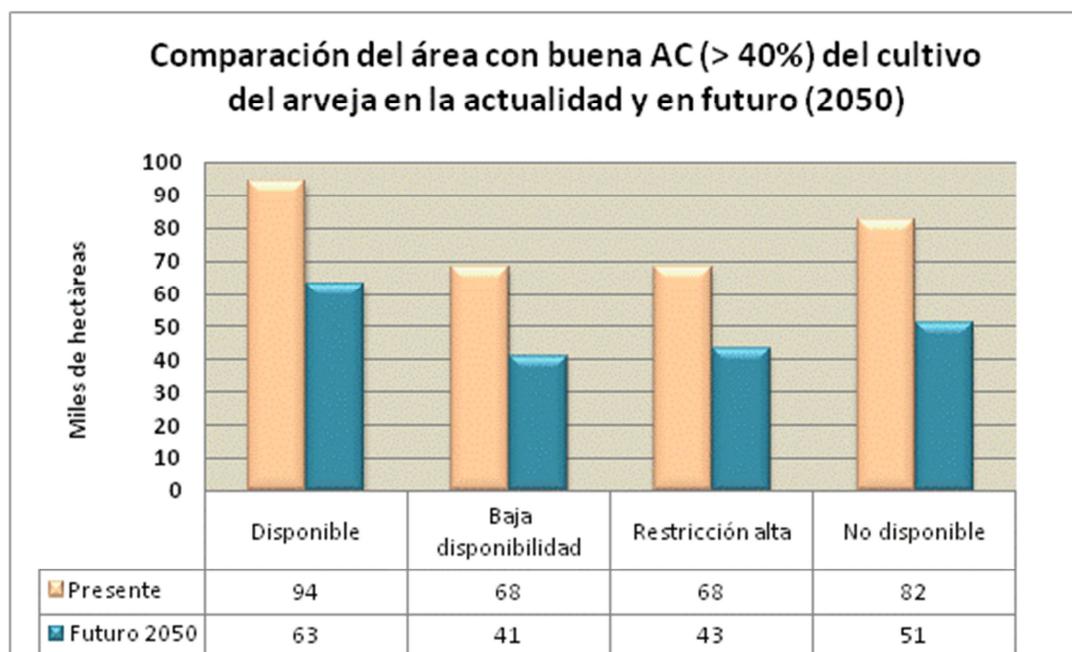
1.9.2.2 Arveja

Tabla 13: Área de las zonas con buena aptitud para arveja en el futuro

Arveja		hectáreas en miles	
Tipo de restricción	presente	futuro 2030	futuro 2050
Disponible	94	75	63
Baja disponibilidad	68	49	41
restricción alta	68	51	43
no disponible	82	58	51

Fuente: Elaboración propia

Figura 26 : Comparación del área con buena AC para Arveja en la actualidad y en el año 2050



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 26 se puede observar que tanto para brócoli como para arveja, el número de hectáreas con buena AC disminuiría a medida que pasa el tiempo, además el área disponible para la siembra sería modesta si se tiene en cuenta

que las áreas de los otros tipos de restricción tienen casi el mismo número de hectáreas.

La reducción en el número de hectáreas con la mejor disponibilidad (terreno disponible y con buena AC [$> 40\%$]) es de 8 mil hectáreas para brócoli y de 31 mil hectáreas para arveja en el año 2050.

Figura 27: porcentaje de pérdida de área apta para arveja hasta el año 2050



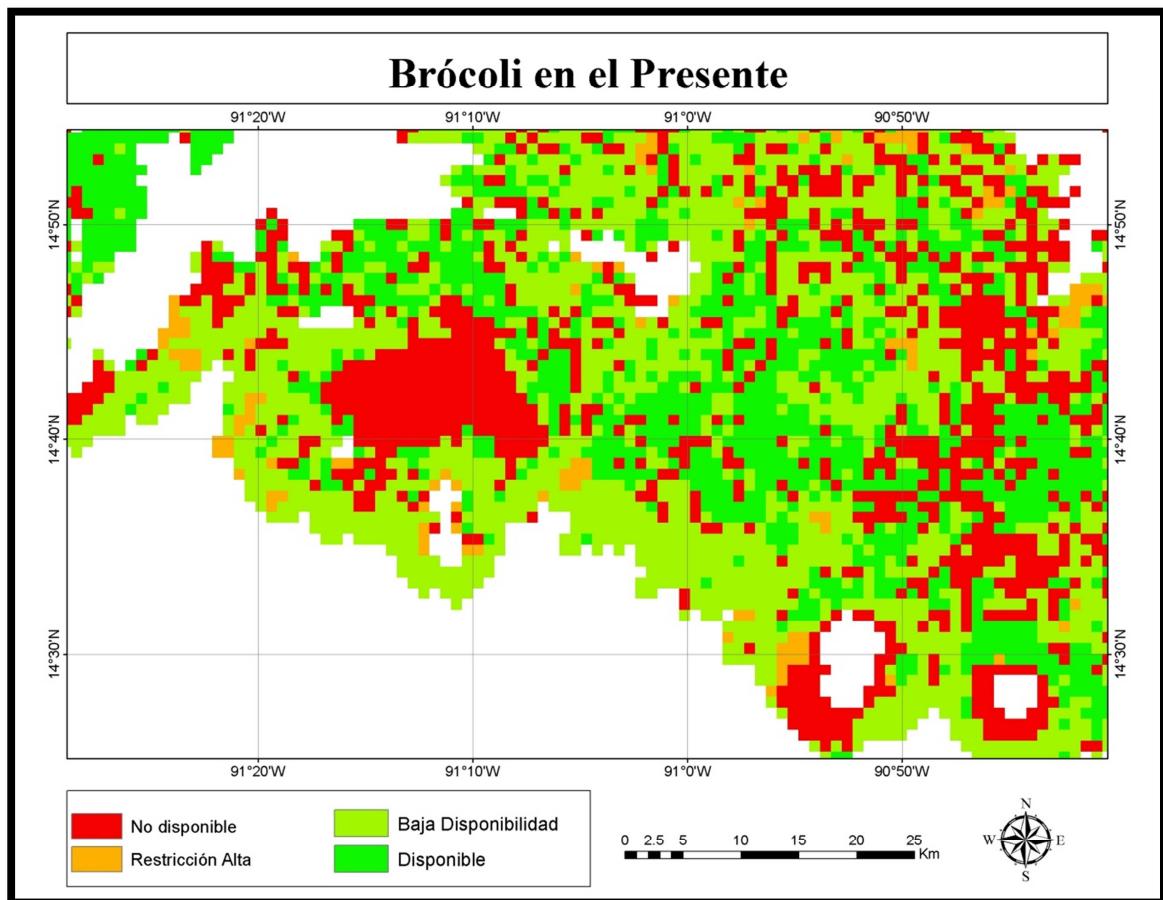
Fuente: Elaboración propia

1.9.3 Zonas con AC mayor a 40% en la actualidad Vs. zonas que podrían presentar buena AC en el 2050.

A continuación se presentan las zonas con buena AC según las condiciones climáticas, es decir, cuyos valores superan el 40%. A la vez, la zona se clasificó según el tipo de restricción de disponibilidad de la tierra.

1.9.3.1 Brócoli

Figura 28: Brócoli, aptitud climática mayor a 40% en el presente

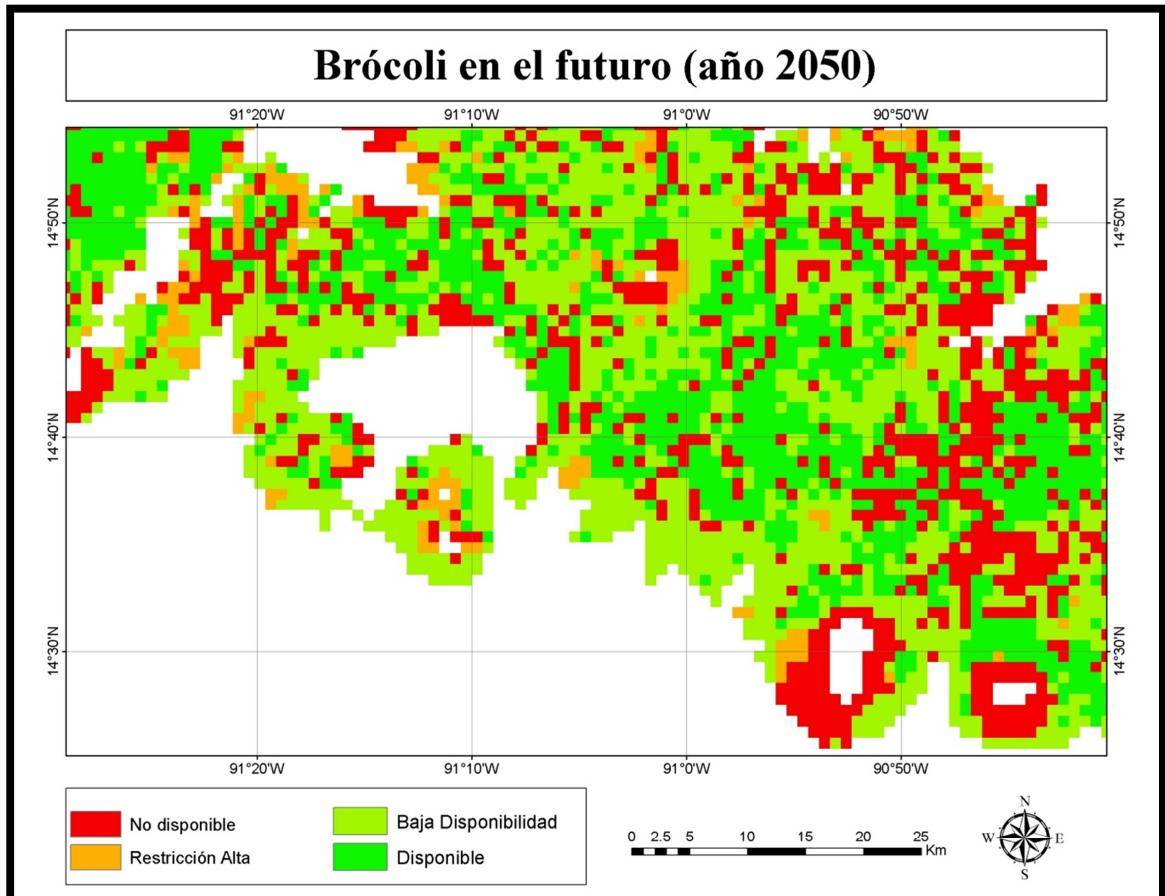


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el análisis del mapa de la figura anterior (Figura 28), se encontró que hay alrededor de 106 mil hectáreas que cumplen las dos características buscadas en el estudio, es decir AC superior al 40 % y valores altos de disponibilidad de la tierra.

A continuación, en la Figura 29, se muestra el mapa de las zonas con que tendría buena AC el año 2050. Estas zonas no necesariamente tiene buena AC en la actualidad. Este tipo de análisis permitió conocer nuevas zonas potenciales a futuro que anteriormente no se habían detectado.

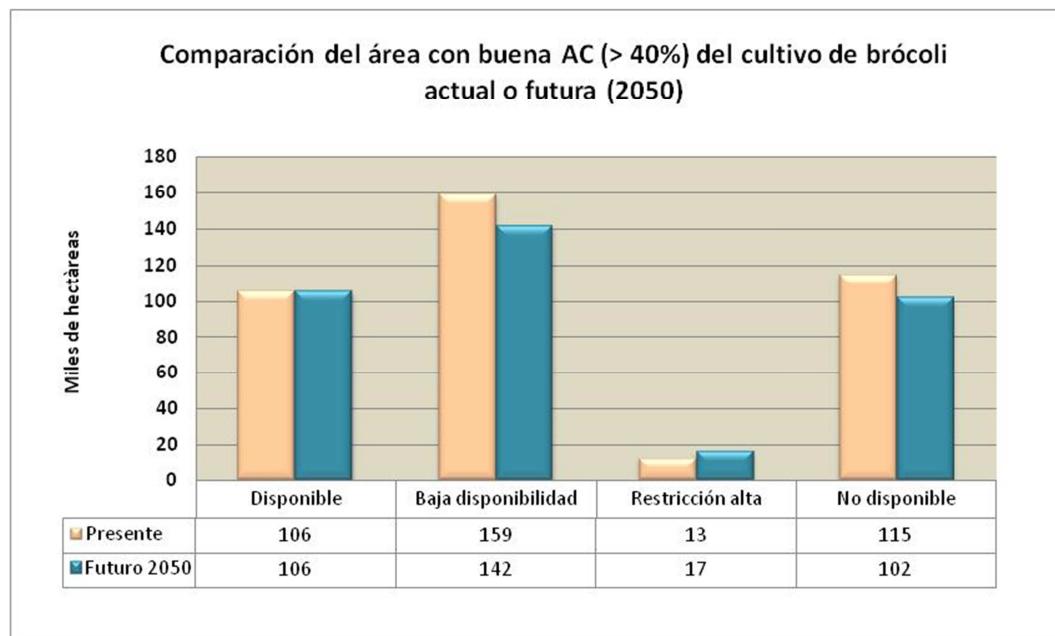
Figura 29: Brócoli, aptitud climática mayor a 40% en el futuro



Fuente: Elaboración propia

Las comparaciones entre los mapas de la actualidad y del futuro (2050), permitieron establecer que el área con buena AC y además con altos valores de disponibilidad, se conservaría hasta llegar al año 2050. Además de ello, la zona de alta restricción ganaría AC, de manera que la zona apropiada para el crecimiento del cultivo se extendería. Ver Figura 30.

Figura 30: Comparación del área con buena AC para brócoli



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica anterior se puede apreciar que la zona de alta restricción para el cultivo de brócoli. Se podría incrementar. Esta diferencia se puede apreciar mejor en la gráfica que se muestra a continuación (Figura 31), en ella, la zona de restricción alta se muestra con valores negativos, producto de la diferencia entre los valores actuales y futuros, por lo tanto se encontró que en el año 2050 se tendría un número mayor de hectáreas con buena AC en zonas de alta restricción.

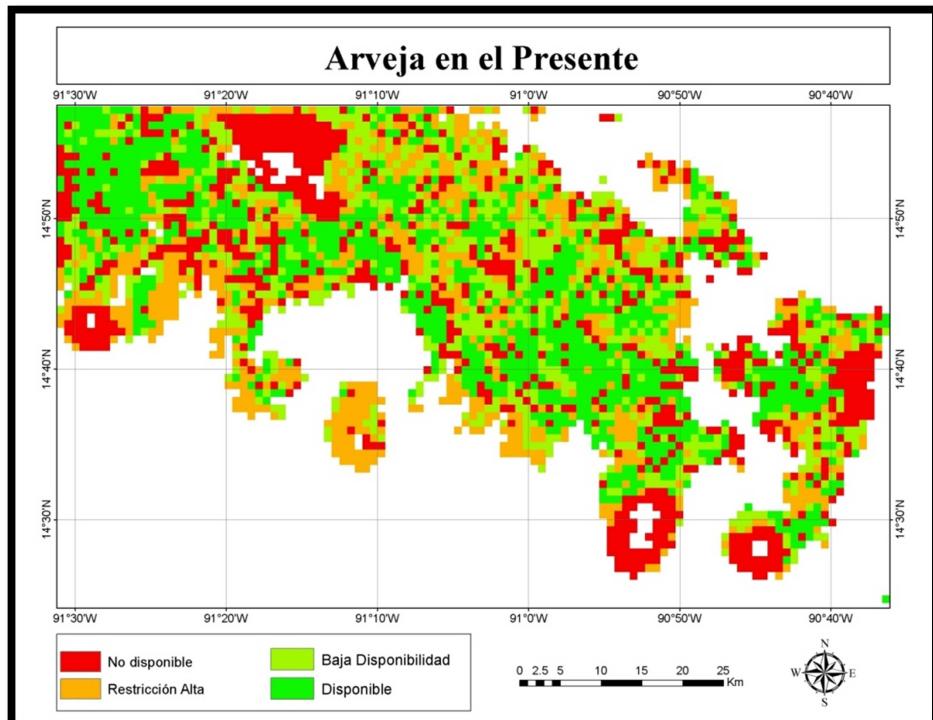
Figura 31: Perdida de área con buena Ac al año 2050



Fuente: Elaboración propia

1.9.3.2 Arveja

Figura 32: Arveja, aptitud climática mayor a 40% en el presente

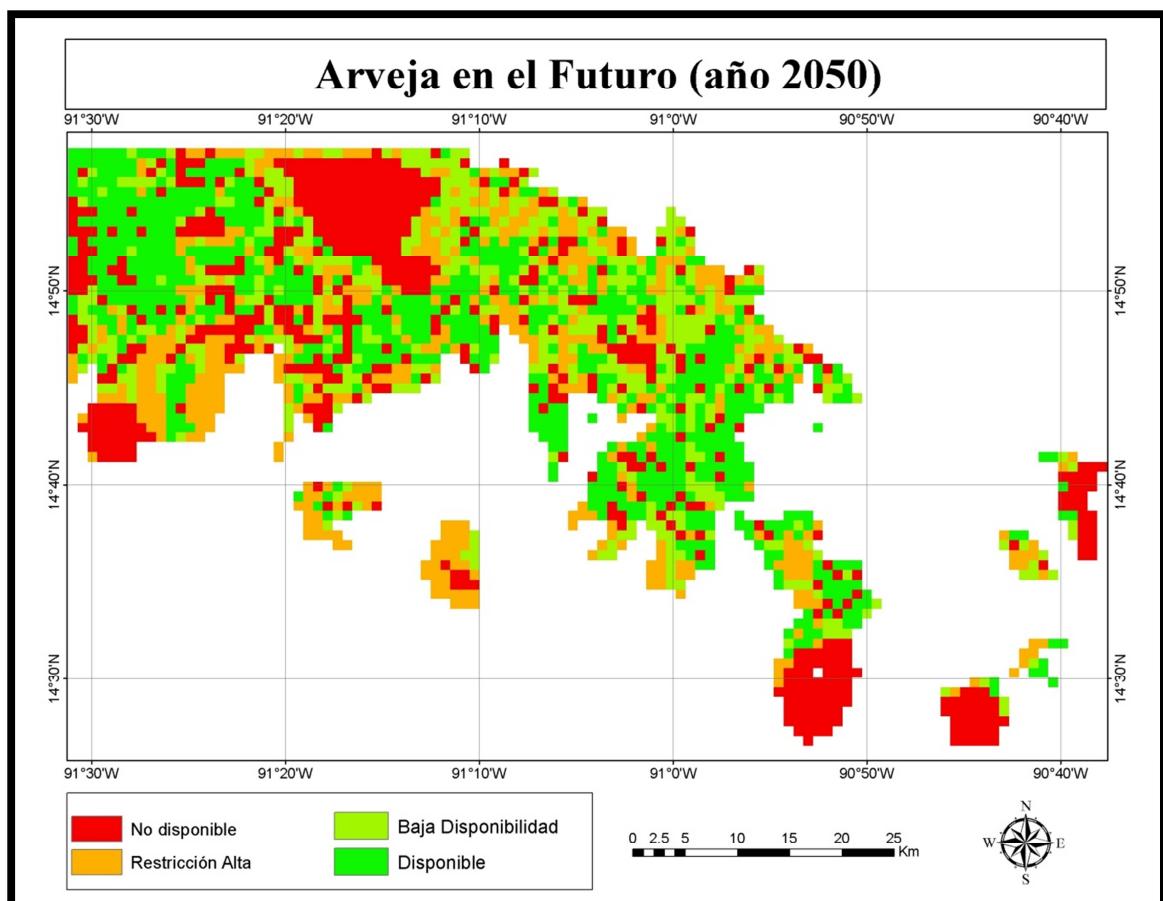


Fuente: Elaboración propia

Al establecer la diferencia entre el mapa actual y futuro de las zonas con buena AC para arveja, se notó que hay disminución del área. Especialmente en el sureste de la zona de estudio.

En el mapa de la Figura 33, se puede ver que gran parte de la zona apropiada según las condiciones climáticas, disminuye su área.

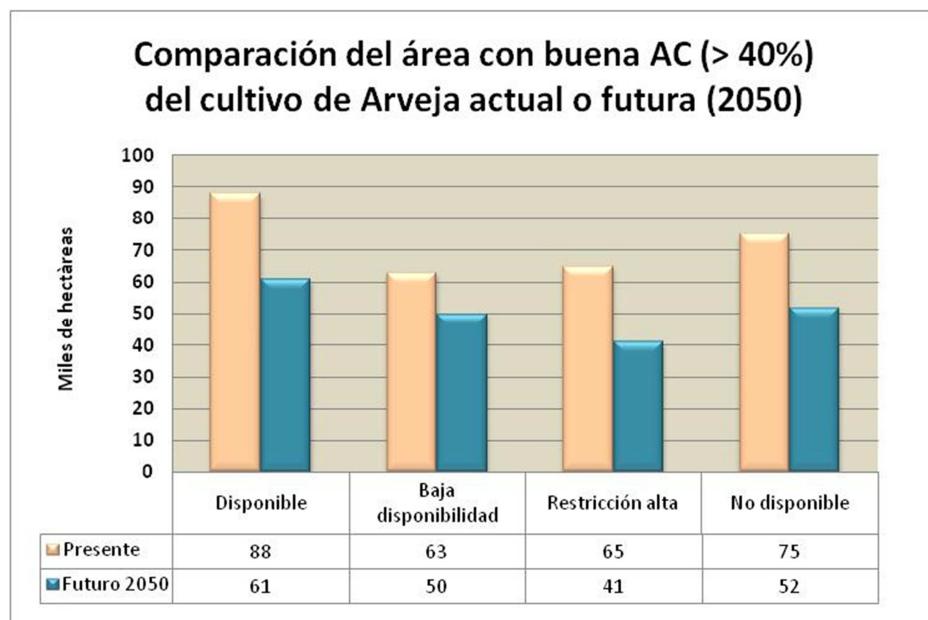
Figura 33: Arveja, aptitud climática mayor a 40% en el futuro



Fuente: Elaboración propia

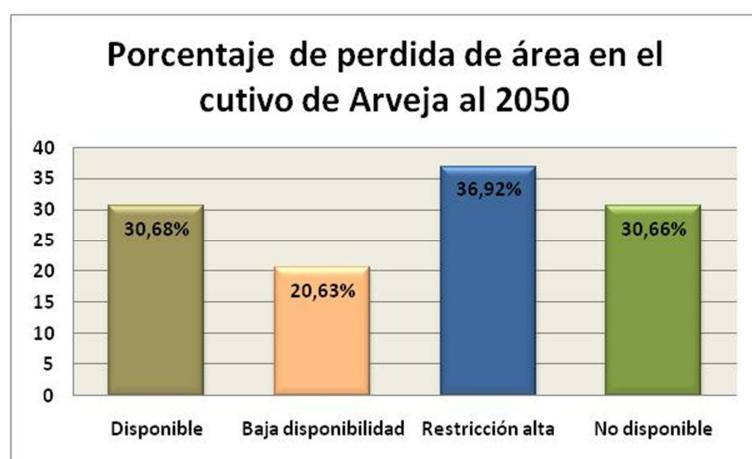
Además de ello, y contrario a lo visto con el caso de brócoli, las zonas disponibles para el cultivo de arveja disminuirían en 27 mil hectáreas, lo cual representa el 31% del área con las similares características en la actualidad. Ver y Figura 35 y Figura 35.

Figura 34: Comparación del área con buena AC para arveja



Fuente: Elaboración propia

Figura 35: Perdida de área con buena Ac al año 2050



Fuente: Elaboración propia

1.9.4 Zonas que tendrían buena aptitud en el futuro, sin importar su localización en la actualidad.

Los análisis descritos anteriormente, se hicieron con base en las zonas que en la actualidad tendrían buena AC para los cultivos mencionados. Esto puede limitar la posibilidad de encontrar otros sitios que podrían tener buena AC en el futuro (año 2050). Para evitar esto, se hizo también otro tipo de análisis para detectar zonas donde se podría presentar buena AC en el futuro aunque no sean zonas atractivas por su porcentaje de AC en la actualidad.

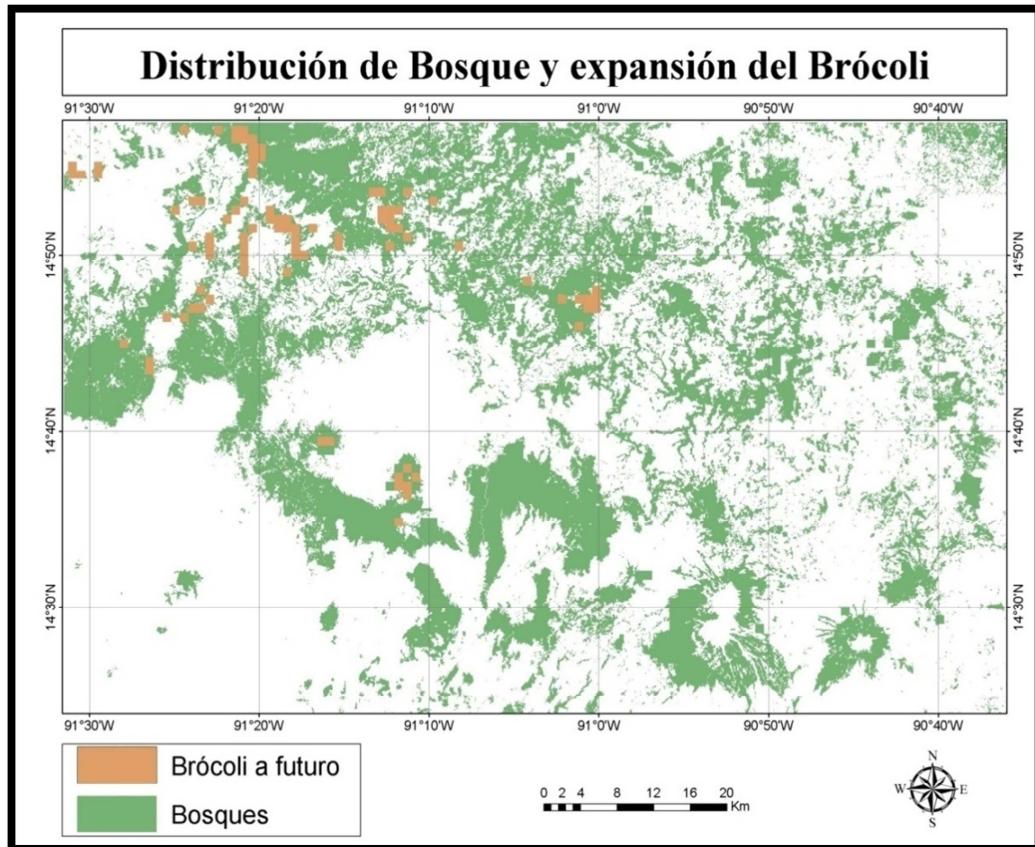
A continuación se presentan los resultados para cada cultivo.

1.9.4.1 Brócoli

Para el caso del brócoli, se prevé que algunas zonas del norte de la zona de estudio ganen AC. Sin embargo esta zona presenta alta restricción según el análisis de disponibilidad.

Revisando detenidamente nos podemos dar cuenta que esto se debe a la presencia de bosque en la posible zona de expansión. Ver Figura 36.

Figura 36: comparación de zona de bosque y zonas que podrían ganar AC a futuro



Fuente: Elaboración propia

Para cuantificar el área que ganaría AC a futuro se realizó un conteo de pixeles, dando como resultado un área aproximada de 4.000 ha. La Figura 37 representa la distribución del área con buena AC a futuro.

Figura 37: Disminución de Área con buena AC para Brócoli, con relación a la extensión actual



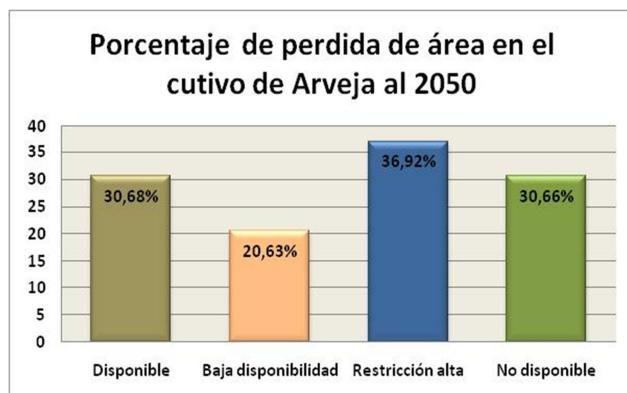
Fuente: Elaboración propia

La gráfica anterior muestra que las zonas etiquetadas como: Disponible, Baja disponibilidad y No disponible; y que además tendrían buena AC a futuro, pierden cierto porcentaje de área con relación al área actual. Sin embargo la zona etiquetada con Alta restricción, gana 30% de área con respecto a lo que se tiene en la actualidad.

1.9.4.2 Arveja

Para el caso de Arveja podemos observar con preocupación que la tendencia es igualmente hacia la disminución del área con buena AC a futuro. Ver Figura 38.

Figura 38: Disminución de Área con buena AC para Arveja, con relación a la extensión actual



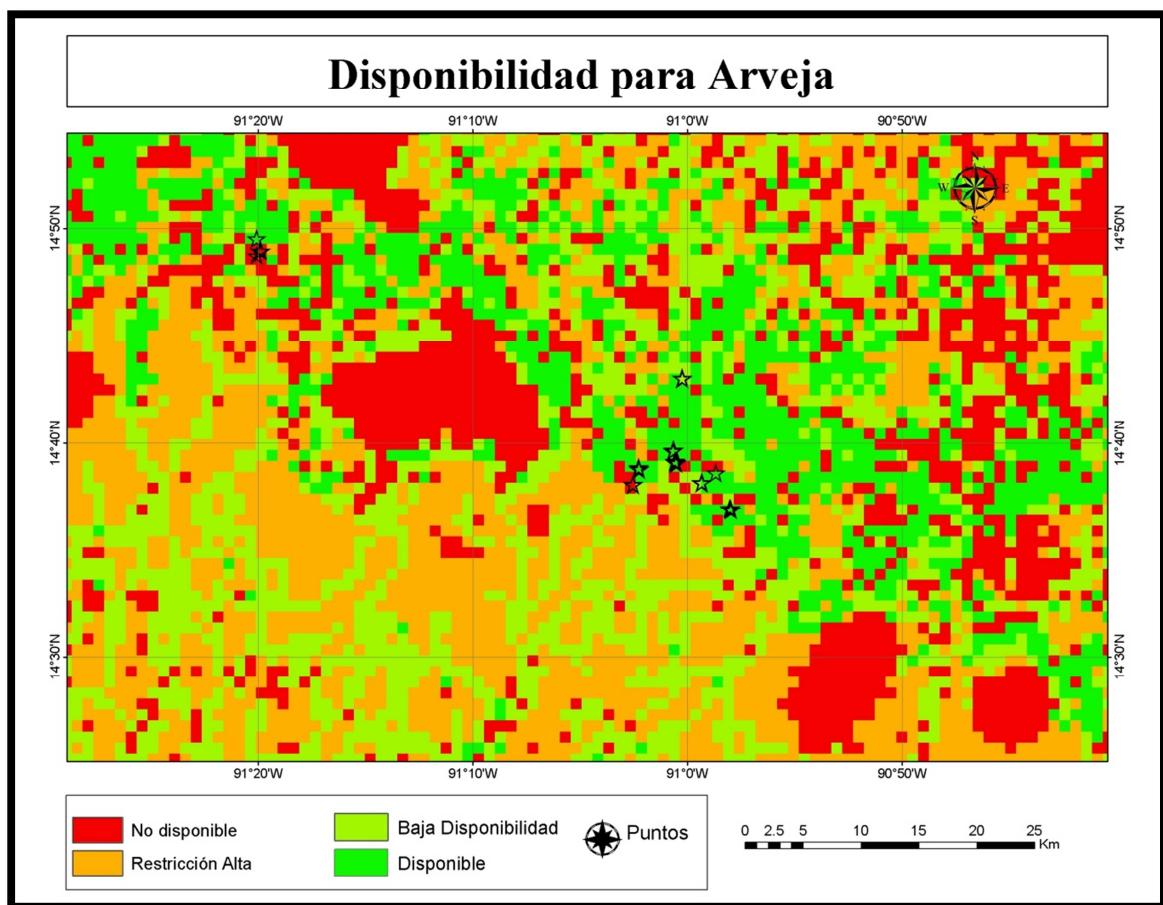
Fuente: Elaboración propia

1.10 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Una aproximación de validación de los resultados se realizó superponiendo 27 puntos correspondientes a coordenadas de presencia de cultivos de arveja, en su mayoría, y algunos de brócoli; posteriormente se verificaron especialmente las áreas etiquetadas como no zonas no disponibles.

La validación se hizo solamente con el mapa de disponibilidad de arveja, puesto que la característica de 'No disponible' es la siempre misma sin importar el tipo de cultivo.

Figura 39: Puntos de presencia de cultivos de brócoli y arveja



Fuente: Elaboración propia

Para mayor claridad se elaboró la Tabla 14 con los valores extraídos del mapa anterior.

Tabla 14: Porcentaje de disponibilidad para arveja dulce

ID	Longitud(x)	Latitud(y)	Disponibilidad (%)
1	-91.334500	14.825060	Baja disponibilidad
2	-91.334290	14.811960	No disponible
3	-91.331950	14.815850	Restricción alta
4	-91.331560	14.815710	Restricción alta
5	-91.331090	14.815700	Restricción alta
6	-90.967010	14.615610	disponible
7	-90.966460	14.615590	disponible
8	-90.966260	14.614670	disponible
9	-90.966130	14.614360	disponible
10	-90.988530	14.635950	Baja disponibilidad
11	-90.988900	14.635590	Baja disponibilidad
12	-90.977720	14.643180	disponible
13	-91.003750	14.716440	Restricción alta
14	-91.004230	14.716880	Restricción alta
15	-91.009220	14.651950	Baja disponibilidad
16	-91.009510	14.652500	Baja disponibilidad
17	-91.009580	14.651290	Baja disponibilidad
18	-91.008730	14.651050	Baja disponibilidad
19	-91.008390	14.650860	Baja disponibilidad
20	-91.010340	14.660780	Baja disponibilidad
21	-91.010800	14.660560	Baja disponibilidad
22	-91.011020	14.660120	Baja disponibilidad
23	-91.037690	14.647350	disponible
24	-91.037880	14.646720	disponible
25	-91.037440	14.646150	disponible
26	-91.037320	14.646350	disponible
27	-91.042210	14.634700	No disponible
28	-91.042180	14.634330	No disponible

Fuente: Elaboración propia

Con los anteriores resultados se pudo observar que tres puntos (punto 2, punto 27 y punto 28) aparecen sobre zonas etiquetadas como no disponible. Esto representó un 11% de error en el procedimiento realizado. En el caso de los tres

puntos mencionados, hay algunas zonas de bosque y de matorrales aledaños precisamente a los lugares con buena disponibilidad para cultivar.

En general, una de las causas de error fue la resolución de las superficies (que es de aproximadamente 1km en el ecuador). Esto puede dificultar la diferenciación clara entre un tipo de uso y otro en algunos casos.

Finalmente, otro origen de error pudo ser la misma selección de los usos del suelo, puesto que no se cubrió en su totalidad todas las posibilidades para la zona estudiada.

5. CONCLUSIONES

Actualmente en gran parte del territorio se está violando el límite de las zonas de amortiguamiento que la ley establece, lo que pone en peligro la sostenibilidad de la agricultura en general. La conservación de los bosques es realmente importante, sin embargo al ser tomados en cuenta en el estudio, se pudo notar que se reduce considerablemente el área cultivable de la zona.

En términos generales, la parte sur-oeste de la zona estudiada es poco atractiva para el crecimiento de los cultivos, contrario al resto del territorio, el cual presenta mejores valores de aptitud climática y pocas restricciones tanto en la actualidad como en el año 2050.

Los resultados obtenidos con el análisis de información de AC y de restricciones espaciales para los cultivos de brócoli y arveja dulce en el altiplano guatemalteco, permiten concluir que en la zona podrían presentarse las siguientes situaciones:

Hasta el año 2050 se prevé que la temperatura anual tendría un incremento de 2.2°C y la precipitación anual disminuiría 33 milímetros en todo el territorio. Perjudicando así los cultivos de brócoli y arveja.

Gran parte del territorio que en la actualidad tiene un promedio de AC mayor a 40%, y a la vez tiene pocas restricciones espaciales para el crecimiento del brócoli, sufriría una disminución del 8% hasta el año 2050.

Aquellas zonas que en la actualidad tienen buena AC para el cultivo de arveja y además con pocas restricciones espaciales para su crecimiento, sufrirían disminución del 30% de AC hasta el año 2050.

Hasta el año 2050, algunas zonas que en la actualidad no superan el 40% de AC para el cultivo de brócoli, podrían ganar AC, expandiéndose hacia los sitios con alta restricción espacial.

6. RECOMENDACIONES

Para la asignación de los pesos que representaron la importancia de cada una de las variables en el análisis, se recurrió a los datos consignados en las encuestas existentes de la zona de estudio. Pero teniendo en cuenta que el método AHP puede desarrollarse de manera muy intuitiva e involucra además el criterio de los productores involucrados, es recomendable que la comunidad afectada participe también del proceso de ponderación. Esto podría realizarse mediante participación activa y abierta en talleres en los que se socialice la metodología y se recoja sus conocimientos y opiniones.

Para el desarrollo del proyecto se uso únicamente la extensión AHP para el software ArcGIS versión 9.3, sin embargo una vez se tengan los pesos de cada una de las variables se podrían utilizar otros operadores de álgebra de mapas tales como Weighted Overlay, y comparar los resultados obtenidos.

En este caso se trabajó con el umbral del 40% de AC para el crecimiento apropiado de las plantas, sin embargo se recomienda analizar otras variables que pudieran estar relacionadas con la AC, por ejemplo el rendimiento de un cultivo, de esta manera podría determinarse mejor el valor mínimo que se requiere para considerar viable una alternativa. Pudiendo incluso determinar este valor según la región específica que se esté analizando.

Para el análisis accesibilidad, se partió del supuesto de que a mayor distancia a las vías, mayor es el costo para acceder hasta el sitio del cultivo, sin embargo, las políticas que se puedan aplicar para facilitar el transporte de los diferentes productos agrícolas, deben ejecutarse de manera responsable priorizando la conservación ambiental, pues como se ha mencionado anteriormente, el mejoramiento en el acceso podría afectar de forma negativa el medio ambiente.

Hay una región relativamente amplia ocupada por bosque, esto es algo que debe tenerse en cuenta para prevenir estimaciones erróneas de área disponible de cultivo. En lo posible se debe diferenciar entre los tipos de bosque, por ejemplo, el bosque plantado de un bosque natural. Estableciendo la distribución de los bosques se podrían dar estimativos más precisos de las áreas que serían aprovechadas para la plantación de los cultivos de interés.

A parte de los cultivos estudiados, se recomienda analizar la AC de otros cultivos en la zona, y establecer comparación entre ellos aplicando también otro tipo de modelos que permitan tomar decisiones adecuadas o que representen mayores ventajas.

BIBLIOGRAFÍA

- Artaraz, M. (2002). Teoría de las Tres Dimensiones de Desarrollo Sostenible. Ecosistemas. Retrieved from <http://www.aeet.org/ecosistemas/022/informe1.htm>
- Barrero C., J. (1996). *Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica en la Ordenación del Territorio* (p. 264). Madrid: Editorial RA-MA.
- CUC, A. B. (2009). “Costos y rentabilidad de unidades agrícolas (producción de brócoli).” Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Congreso de la república de Guatemala. (1989). Ley de áreas protegidas. *Constitución Política de la República de Guatemala*. Ciudad de Guatemala.
- Frau, C. M., Valenzuela, J. G., & ORMAZABAL ROJAS, Y. (2006). Modelación espacial mediante geomática y evaluación multicriterio para la ordenación territorial. *Fac. Ing. - Univ. Tarapacá [online]*, 14(1), 81-89. doi:10.4067/S0718-13372006000100009
- Galacho Jiménez, F. B., & Ocaña, Ocaña, C. (2006). Tratamiento con sig y técnicas de evaluación multicriterio de la capacidad de acogida del territorio para usos urbanísticos: residenciales y comerciales (pp. 1509-1525). Granada.
- García, J. L., Noriega, S. A., Díaz, J. J., & Riva, J. D. (2006). Aplicación del proceso de jerarquía analítica en la selección de tecnología agrícola. *Small*, 30(1), 107-114.
- Gimenez, F., & Federico, M. (2009). *Métodos Numéricos*. Retrieved from Universidad de Buenos Aires.
- Hijmans, R. J, A. Jarvis, S. E Cameron, J. L Parra, P. G., & Jones. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of climatology*, 25(15), 1965-1978.
- Jarvis, A., & Ramirez, J. (2010). Downscaling-WP-01-v3. *Policy Analysis*, (1). Retrieved from <http://ccafs-climate.org/docs/Downscaling-WP-01-v3.pdf>

- Kleynhans, T., & Vink, N. (1998). The agricultural potential of sadc. *Agricultural Economics*, 37(4), 375-397.
- Lagos, P. (2010). climático. *Vulnerabilidad al cambio climático*.
- March I., & A. Flamenco. (1996, September 28). Evaluación rápida de la deforestación en las áreas naturales protegidas de Chiapas (1970-1993). Informe técnico para TNC y USAID. ECOSUR. *Applied Physics A*. Retrieved from http://200.23.34.25/Art_tnc.pdf
- Pender, J., Jagger, P., Nkonya, E., & Sserunkuuma, D. (2001). *Development pathways and land management in uganda : causes and implications*.
- Pender, J., Nkonya, E., Jagger, P., Sserunkuuma, D., & Ssali, H. (2004). Strategies to increase agricultural productivity and reduce land degradation: evidence from Uganda. *Agricultural Economics*, 31(2-3), 181-195. doi:10.1111/j.1574-0862.2004.tb00256.x
- Ramirez sanchez, L. G. (2009). *Evaluación de tierras para el cultivo del aguacate de acuerdo con el conocimiento local del paisaje en la región del Pico de Tancítaro, Michoacán*. Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Roa, J. G. (2007). Estimacion de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes , estado Mérida-Venezuela, 48(2), 183-219.
- Robert J. Hijmans, Luigi Guarino, Coen Bussink, Prem Mathur, Mariana Cruz, Israel Barrantes, E. R. (2004). DIVA-GIS, Sistema de Información Geográfica para el Análisis de Datos de Distribución de Especies [manual].
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. (McGrawHill, Ed.).
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M., Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L., & Miller. (2007). *Summary for Policymakers. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*.
- UGR. (2000). Taller de Planificación: Análisis Territorial mediante Sistemas de Información Geográfica. *Selección de alternativas. evaluación multicriterio*.