



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

Carrera de Agronomía

Validación del modelo de cultivo DSSAT CERES-Maize para simular rendimientos de maíz blanco bajo condiciones de cambio climático futuro en el sector la Argelia, Loja

Trabajo de Integración Curricular
previo a la obtención del título de
Ingeniera Agrónoma

AUTOR:

María Fernanda Zapata Cartuche

DIRECTORA:

PhD. Mirian Irene Capa Morocho

Loja – Ecuador

2024



unl

Universidad
Nacional
de Loja

**Sistema de Información Académico
Administrativo y Financiero - SIAAF**

CERTIFICADO DE CULMINACIÓN Y APROBACIÓN DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, **Capa Morocho Mirian Irene**, director del Trabajo de Integración Curricular denominado **Validación del modelo de cultivo DSSAT CERES-Maize para simular rendimientos de maíz blanco bajo condiciones de cambio climático futuro en el sector la Argelia, Loja.**, perteneciente al estudiante **Maria Fernanda Zapata Cartuche**, con cédula de identidad N° **1150429569**.

Certifico:

Que luego de haber dirigido el **Trabajo de Integración Curricular**, habiendo realizado una revisión exhaustiva para prevenir y eliminar cualquier forma de plagio, garantizando la debida honestidad académica, se encuentra concluido, aprobado y está en condiciones para ser presentado ante las instancias correspondientes.

Es lo que puedo certificar en honor a la verdad, a fin de que, de así considerarlo pertinente, el/la señor/a docente de la asignatura de **Integración Curricular**, proceda al registro del mismo en el Sistema de Gestión Académico como parte de los requisitos de acreditación de la Unidad de Integración Curricular del mencionado estudiante.

Loja, 28 de Febrero de 2024

F)  Escaneo este código QR para
MIRIAN IRENE CABA
MOROCHO

**DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**


Certificado TIC/TT.: UNL-2024-000347

1/1
Educamos para **Transformar**

Autoría

Yo, **María Fernanda Zapata Cartuche**, declaro ser autora del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma: 

Cédula de identidad: 1150429569

Fecha: 04 de septiembre del 2024

Correo electrónico: maria.zapata@unl.edu.ec

Teléfono: 0989542447

Carta de autorización por parte de la autora, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular.

Yo, **María Fernanda Zapata Cartuche**, declaro ser autora del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Validación del modelo de cultivo DSSAT CERES-Maize para simular rendimientos de maíz blanco bajo condiciones de cambio climático futuro en el sector la Argelia, Loja**, como requisito para optar por el título de **Ingeniera Agrónoma**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los cuatro días del mes de septiembre del dos mil veinticuatro.

Firma:



Autora: María Fernanda Zapata Cartuche

Cédula de identidad: 1150429569

Dirección: Loja – Carigan - Teneria

Correo electrónico: maria.zapata@unl.edu.ec

Teléfono: 0989542447

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Integración Curricular:

PhD. Mirian Irene Capa Morocho.

Dedicatoria

Dedico mi Trabajo de Integración Curricular a Dios y la Virgen del Cisne por guiarme en el transcurso de mis estudios académicos, a mis padres Darwin Hernan y Noemi del Carmen quienes me han apoyado y me ha motivado siendo mi motor principal, gracias por inculcarme sus valores y formarme en una persona de bien, su apoyo y amor incondicional fue de gran importancia para mí.

A mis hermanos, Kevin Alexander y Mateo Josué quienes son parte fundamental en mi vida, cada uno de ellos con sus distintas personalidades estuvieron para escucharme, motivarme y sobre todo siempre apoyarme. Además, a mi tía Sulema quien me brindo su ayuda y apoyo en mis estudios académicos.

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber” (Albert Einstein).

María Fernanda Zapata Cartuche

Agradecimiento

En primer lugar, le agradezco a Dios y la Virgen porque son mis guías espirituales durante toda mi vida, hoy culmino mis estudios académicos a pesar de tantas pruebas negativas que la vida me tuvo preparada, pero la fé siempre estuvo conmigo.

Agradezco, a la Universidad Nacional de Loja por permitirme formar parte de su alma mater, a la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables y en especial a la Carrera de Agronomía y a todos sus docentes quienes supieron transmitir y compartir sus conocimientos de manera eficiente para mi formación profesional.

A mi directora de Trabajo de Integración Curricular por ser mi guía en todo este proceso Dra. Mirian Irene Capa, quien con sus conocimientos y orientación durante el desarrollo de este trabajo estuvo para guiarme y brindarme ideas para mejorar. Quiero darle las gracias por motivarme en mis momentos difíciles y ser una persona en quien confiar.

Agradecer a mis padres, hermanos, tíos y abuelitos por siempre confiar en mí, porque cada uno de ellos me brindo palabras de superación, siendo una parte fundamental en mi vida y en el transcurso de mis estudios.

"La verdadera amistad debe apoyarse en las cosas que compartimos y en las que compartiremos en el futuro, sin ninguna intención de conseguir nada a cambio de ella"(Jorge Bucay). Quiero extender mi agradecimiento a mis amigos Stefania, Yamilex, Gisela, Jorge y Alexis quienes fueron parte de esta bonita experiencia en toda mi carrera universitaria, quien cada uno de ellos estuvo para brindarme palabras de apoyo y motivación. Gracias por las horas compartidas en nuestras aulas, por cada uno de los trabajos realizados en conjunto, siempre los recordare por todas las experiencias que hemos compartido y sobre todo por las sonrisas que siempre nos caracterizaban.

María Fernanda Zapata Cartuche

Índice de contenidos

Portada.....	i
Certificación	ii
Autoría.....	iii
Carta de autorización.....	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos.....	vii
Índice de tablas	x
Índice de figuras	xi
Índice de anexos	xii
1. Título.....	1
2. Resumen	2
Abstrac	3
3. Introducción.	4
4. Marco teórico.	7
4.1. Maíz (<i>Zea mays</i> L.).....	7
4.1.1. Importancia	7
4.1.2. Origen	7
4.1.3. Producción y rendimiento de maíz	8
4.1.4. Fenología y crecimiento.....	8
4.1.4.1. Estados vegetativos.	9
4.1.4.2. Estados de Crecimiento.....	10
4.2. Modelos de simulación.....	11
4.2.1. Importancia de uso y aplicaciones	11
4.2.2. Tipos de modelos	12
4.2.3. DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer CERES-Maize) 12	

4.2.4. Datos requeridos por el modelo	13
4.2.4.1. Clima.	13
4.2.4.2. Suelo.	13
4.2.4.3. Manejo del cultivo.	13
4.3. Modelos del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)	14
4.3.1. Proyecto de intercomparación de modelos acoplados	14
4.3.2. Modelos de circulación general	14
5. Metodología.	16
5.1. Localización del estudio	16
5.2. Metodología general	16
5.2.1. Tipo y alcance de la investigación	16
5.3. Metodología para el primer objetivo	17
5.3.1. Base de datos del suelo	17
5.3.2. Base de datos del clima.....	17
5.3.3. Base de datos del cultivo.....	17
5.3.4. Validación del modelo	18
5.3.5. Análisis estadísticos	18
5.3.5.1. Error cuadrático medio (porcentaje).	18
5.4. Metodología para el segundo objetivo.....	19
5.4.1. Modelo de predicción	19
6. Resultados.	20
6.1. Validación del modelo DSSAT CERES-Maize	20
6.1.1 Propiedades físicas y químicas del suelo	20
6.1.2. Base de datos de climáticos	21
6.1.3. Coeficientes genéticos calibrados y validados.....	22
6.2. Efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de maíz (<i>Zea mays</i> L.)	24

INIAP-103 “Mishqui Sara”	24
6.2.1. Rendimiento.....	24
6.2.2. Fenología.....	25
6.2.2.1. Variación siembra-antesi (fase vegetativa).....	25
6.2.2.2. Variación de la fase antesi-cosecha (fase reproductiva).....	26
6.2.2.3. Variación del ciclo de cultivo de maíz (siembra-cosecha).....	27
7. Discusiones.....	29
8. Conclusiones.	32
9. Recomendaciones.....	33
10. Bibliografía.....	34
11. Anexos.....	38

Índice de tablas

Tabla 1. Etapas vegetativas de cultivo de maíz (<i>Zea mays</i>).....	8
Tabla 2. Etapas reproductivas de cultivo de maíz (<i>Zea mays</i>).....	10
Tabla 3. Características físico – químicas del perfil del suelo de las parcelas donde realizaron los ensayos de maíz blanco en la Quinta Experimental Docente La Argelia.....	20
Tabla 4. Constantes hidrofísicas del perfil del suelo de las parcelas donde realizaron los ensayos de maíz blanco en la Quinta experimental Docente La Argelia.....	21
Tabla 5. Valores de coeficientes genéticos de maíz variedad INIAP 103 “Mishqui Sara” que se ajustan a la fenología y crecimiento del modelo CERES-Maize.	23
Tabla 6. Validación de la fenología de la variedad de maíz variedad INIAP 103 “Mishqui Sara”.	23
Tabla 7. Validación del rendimiento, IAF y % N en el grano de la variedad de maíz INIAP 103 “Mishqui Sara”.....	24

Índice de figuras

Figura 1. Fases fenológicas del maíz según Ritchie y Hanway, (1982).....	8
Figura 2. Localización de la zona de estudio donde realizaron los ensayos de campo, ubicado en la Quinta Experimental Docente la Argelia, perteneciente a La Universidad Nacional de Loja.....	16
Figura 3. Climatología de la estación meteorológica La Argelia: A) Temperatura máxima, media y mínima (Tmax, Tmedia y Tmin); B) Radiación; C) Precipitación para diferentes periodos de cultivo (noviembre 2018-junio 2019, noviembre 2020 -julio 2021 y climatología plurianual (1990-2013).....	22
Figura 4. Proyecciones de variación de rendimiento de maíz blanco INIAP-103 “Mishqui Sara” bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero con los modelos climáticos GFDL, IPSL, MPIE, MRIE, UKES para el periodo 2041-2060 y 2081-2100.	25
Figura 5. Proyecciones de variación del ciclo siembra-antesis de maíz blanco INIAP-103 “Mishqui Sara” bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero con los modelos climáticos GFDL, IPSL, MPIE, MRIE, UKES para el periodo 2041-2060.....	26
Figura 6. Proyecciones de variación del ciclo antesis-cosecha de maíz blanco INIAP-103 “Mishqui Sara” bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero con los modelos climáticos GFDL, IPSL, MPIE, MRIE, UKES para el periodo 2041-2060 y 2081-2100.....	27
Figura 7. Proyecciones de variación desde la siembra-cosecha de maíz blanco INIAP-103 “Mishqui Sara” bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero con los modelos climáticos GFDL, IPSL, MPIE, MRIE, UKES para el periodo 2041-2060 y 2081-2100.....	28

Índice de anexos

Anexo 1. Construcción de la calicata	38
Anexo 3. Toma de muestras	38
Anexo 5. Tamizado de muestras	38
Anexo 7. Modificación de coeficientes genéticos.....	39
Anexo 8. Base de datos de clima.....	39
Anexo 9. Resultado de las simulaciones en el programa DSSAT CERES-Maize.....	39
Anexo 10. Certificado del resumen.....	40

1. Título.

Validación del modelo de cultivo DSSAT CERES-Maize para simular rendimientos de maíz blanco bajo condiciones de cambio climático futuro en el sector la Argelia, Loja.

2. Resumen

El modelo de simulación de cultivo DSSAT CERES-Maize permite simular el crecimiento y desarrollo del maíz, mismo que ha sido ampliamente utilizado para estudios de impactos de la variabilidad y cambio climático. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto del cambio climático futuro en el rendimiento de maíz blanco mediante el uso del modelo DSSAT CERES-Maize calibrado y validado bajo las condiciones ambientales de Loja. Para ello, se realizó la validación del modelo utilizando información de ensayos de campo realizados en los años 2018-2019 y 2020-2021 bajo distintos tratamientos de densidad de siembra y nutrición. Una vez validado el modelo, se utilizó 5 modelos climáticos (GFDL, IPSL, MPIE, MRIE, UKES) bajo 3 escenarios de cambio climático (ssp126, ssp370, ssp585) para los periodos de 2041-2060 y 2081-2100.

Los coeficientes genéticos que más se ajustaron a la fenología y rendimiento de la variedad de maíz INIAP 103 “Mishqui Sara” fueron P1:255 °C; P5: 820 °C; G2:420 g; G3: 9 mg/día y PHINT: 68.30 °C. El modelo simuló un RMSEP excelente en la fase de antesis (0.90 % y 0.85 %), madurez fisiológica (6.22 % y 5.97 %) y rendimiento (5.56 % y 8.96 %) en la calibración y validación respectivamente. En los resultados de las simulaciones bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (ssp126, ssp370 y ssp585), el rendimiento promedio de maíz blanco aumentará en 2.14 % en el escenario ssp126 (bajas emisiones de CO₂), mientras que, se prevé una reducción de 14.86% en el escenario ssp370 (emisiones medias de CO₂) y de 2.84 % en el escenario ssp585 (altas emisiones de CO₂) para el periodo 2041-2060. Para el periodo 2081-2100, el rendimiento promedio de maíz blanco podría aumentar un 4.01 % en el ssp126, pero se proyecta una disminución de 17.65 % y 20.18 % a mayores emisiones de gases de efecto invernadero, ssp370 y ssp585, respectivamente. En cuanto, a las proyecciones de variación del ciclo fenológico del maíz, la fase vegetativa y reproductiva se verán disminuidas bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (ssp126, ssp370 y ssp585) con variaciones entre el 25 % y 38 % de reducción en su ciclo total en los dos periodos evaluados. Estos resultados indican que se debería realizar medidas de adaptación del cultivo de maíz blanco, como implementar estrategias de mitigación y prácticas agrícolas sostenibles para contrarrestar los efectos negativos del cambio climático.

Palabras clave: Rendimiento, cambio climático, DSSAT CERES-Maize, emisiones de gases de efecto invernadero.

Abstrac

The DSSAT CERES-Maize crop simulation model simulates the growth and development of maize, which has been widely used for studies on the impacts of climate variability and change. The objective of this work was to determine the effect of future climate change on white corn yields using the DSSAT CERES-Maize model calibrated and validated under the environmental conditions of Loja. For this purpose, model validation was performed using information from field trials conducted in 2018-2019 and 2020-2021 under different planting density and nutrition treatments. Once the model was validated, 5 climate models (GFDL, IPSL, MPIE, MRIE, UKES) were used under 3 climate change scenarios (ssp126, ssp370, ssp585) for the periods 2041-2060 and 2081-2100.

The genetic coefficients that best matched the phenology and yield of INIAP 103 maize variety “Mishqui Sara” were P1:255 °C; P5: 820 °C; G2:420 g; G3: 9 mg/day and PHINT: 68.30 °C. The model simulated excellent RMSEP at the anthesis stage (0.90 % and 0.85 %), physiological maturity (6.22 % and 5.97 %) and yield (5.56 % and 8.96 %) in calibration and validation, respectively. In the results of the simulations under different greenhouse gas emissions scenarios (ssp126, ssp370 and ssp585), the average yield of white corn will increase by 2.14 % in the ssp126 scenario (low CO₂ emissions), while, a reduction of 14.86 % in the ssp370 scenario (medium CO₂ emissions) and 2.84 % in the ssp585 scenario (high CO₂ emissions) is predicted for the period 2041-2060. For the period 2081-2100, average white corn yields could increase by 4.01 % in ssp126, but are projected to decrease by 17.65 % and 20.18 % at higher GHG emissions, ssp370 and ssp585, respectively. As for the projections of variation in the phenological cycle of corn, the vegetative and reproductive phases will be reduced under different scenarios of greenhouse gas emissions (ssp126, ssp370 and ssp585) with variations between 25% and 38% reduction in its total cycle in the two periods evaluated. These results indicate that adaptation measures for white corn cultivation should be implemented, such as mitigation strategies and sustainable agricultural practices to counteract the negative effects of climate change.

Key words: *Yield, climate change, DSSAT CERES-Maize, greenhouse gas emissions*

3. Introducción.

A nivel mundial el maíz (*Zea mays* L.) es una de las gramíneas de gran importancia económica, debido a que se lo utiliza para la alimentación poblacional y animal (Valdez, 2022). En la Sierra del Ecuador, el 95 % de la producción representa maíz blanco, que se cosecha en tierno (choclo) o en grano seco (INIAP, 2021).

Según ESPAC (2022), la producción de maíz suave en la región Sierra es de 38 858 t en grano seco y 44 321 t en choclo, con rendimiento de 1,08 y 3,23 t/ha respectivamente. A pesar de que el maíz suave harinoso se ha extendido en la provincia de Loja, en el año 2022 presentó rendimientos de 1,14 t/ha en seco y 1,27 t/ha en choclo, siendo este último valor inferior a la media nacional y regional. El maíz suave INIAP-103 Mishqui Sara es una de las variedades más importantes que se cultiva a nivel nacional por su alto valor nutritivo, ya que es rica en proteínas y contiene más aminoácidos (triptófano y lisina) que otras variedades (Iglesias et al., 2018).

La temperatura y precipitación con el transcurso de los años ha sufrido contantes variaciones que han venido causando efectos negativos en la producción de maíz, generando grandes pérdidas en su rendimiento en Ecuador (Ludeña y Wilk, 2013). Según Cervantes et al. (2014) tener temperaturas elevadas provoca problemas en la polinización, aumento de la respiración, reducción de la fotosíntesis y de las etapas de desarrollo y en consecuencia la disminución del ciclo fenológico, mientras que, las bajas temperaturas detienen o reducen su crecimiento y desarrollo y, por tanto, su rendimiento (Cervantes et al., 2014).

Por otro lado, otros de los factores que generan una disminución de productividad y por ende bajos rendimientos es utilizar un material genético inadecuado, no establecer la siembra en fechas adecuadas, exceso o uso incorrecto de productos químicos como son herbicidas, pesticidas y fertilizantes, al igual que realizar una mala utilización de herramientas tecnológicas, etc. (Boada y Espinosa, 2016).

En la actualidad con el avance de la tecnología en el sector agrícola, han realizado diversos estudios con la finalidad de determinar como los efectos del cambio climático contribuirán en la producción agrícola a través de diferentes herramientas (modelos de simulación) .Estos son una alternativa mediante la cual es posible predecir el comportamiento de este cultivo, permitiendo comprobar los efectos positivos o negativos que este tendría, debido a que esto nos permite establecer una serie de escenarios probabilísticos del desarrollo de la campaña en términos de variación de rendimiento (Figarola et al., 2020).

En la agricultura a nivel mundial uno de los modelos de simulación de cultivo más utilizado es CERES para maíz, que se encuentra en el programa DSSAT (Sistema de Apoyo para la Toma

de Decisiones en la Transferencia Agrotecnológica). Este modelo tiene como objetivo simular a futuro como se dará el desarrollo fenológico, crecimiento y rendimiento, tomando en consideración cuatro componentes: suelo, clima, manejo y genéticos. Este nos permitirá tomar decisiones agrícolas para mejorar la producción (Castro y Hétier, 2015).

En la presente investigación se pretende conocer el efecto que puede tener en la producción (rendimiento) la variabilidad y cambio climático que cada vez es mayor, tomando en cuenta que conocer esto, nos permitirá adaptarnos y mitigar los efectos del cambio climático a nivel regional, es decir, tomar medidas de adaptación debido a la posibilidad de manipular diferentes variables al momento de realizar el establecimiento del cultivo como: fechas de siembra, fertilizaciones, controles de plagas y enfermedades, para evitar pérdidas de producción.

Objetivos.

Objetivo General

Determinar el efecto del cambio climático futuro en el rendimiento de maíz blanco mediante el uso del modelo DSSAT CERES-Maize bajo las condiciones ambientales de la Argelia, Loja.

Objetivo Específico

- ✓ Validar el modelo de simulación de cultivo DSSAT CERES –Maize en maíz INIAP-103 “Mishqui Sara” bajo las condiciones ambientales de la Argelia, Loja.
- ✓ Analizar el efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) INIAP-103 “Mishqui Sara” en el sector la Argelia, Loja.

4. Marco teórico.

4.1. Maíz (*Zea mays* L.)

4.1.1. Importancia

El maíz es de gran importancia económica a nivel mundial debido a sus múltiples usos y variados, tanto para la alimentación humana y animal. Se los utiliza como: preparados en hojuelas, harinas, grano tierno o seco y conservas, en la dieta de los animales como: forraje, henos, balaceados, granos enteros molidos o quebrados, que son sumamente nutritivos. Este cultivo para optimizar su grano y general diversificación pasa por el proceso industrial en el cual se procesa gran número de productos y subproductos como compost, alcohol, aceites, almidón, glucosa, dextrosa, fructosa, etanol, jabón y otros productos utilizados como medicinales y farmacéuticos, considerándose como una fuente de un gran número de productos industriales, cumpliendo así un aporte de gran importancia para la soberanía alimentaria, (Basantes, 2015).

Sus propiedades nutricionales nos indica que contiene una gran cantidad de vitaminas, minerales y aminoácidos esenciales que conforman una dieta saludable. Aporta más del 10% de la ingesta diaria recomendada de fósforo, magnesio, potasio, vitamina C y vitamina B folato, tiamina y B12, y es una buena fuente de provitamina A, vitamina E, hierro, manganeso, selenio y sodio. y zinc. Además, el maíz contiene antioxidantes y aminoácidos que son esenciales para el crecimiento celular saludable (Basantes, 2015).

4.1.2. Origen

Su origen se dio en México, considerándose una de las primeras plantas cultivadas por los agricultores hace unos 7000 años, ha sido encontrada en Coxcatlán, en el Valle de Tehuacán, Estado de Puebla por un grupo de arqueólogos. Su domesticación fue muy importante debido a que fue el sustento de los pueblos mesoamericanos, siendo el cultivo más consumido y el más resistente a las variaciones del clima (Paliwal, 2011). En Ecuador, la variedad de maíz blanco harinoso, contiene una gran cantidad de proteína, misma que fue introducida en el año 2006, siendo procedente del Centro de Fitoecogenética Pairumani de Bolivia. Esta variedad al tener propiedades nutricionales importantes ayuda a la alimentación de la comunidad (Egüez y Pintado, 2013).

La variedad INIAP 103-Mishqui Sara, para su selección se tomó en cuenta diferentes caracteres agronómicos como el sanidad, cobertura de mazorca y que presente rendimientos elevados a 8t/h, esta variedad fue seleccionada por el programa de Maíz de la Estación Experimental del Austro del INIAP, su creación fue al realizar un selección masal y dos ciclos de selección familiar por medios hermanos (Caiza, 2019). Esta variedad presenta un mayor

potencial y rendimientos en altitudes de 1 700 a 2 650 msnm. Sin embargo, se ha sembrado a 30 msnm en Guayas y Santa Elena y en Sigsig-Azuay hasta 2 650 msnm (Egúez y Pintado, 2013).

4.1.3. Producción y rendimiento de maíz

En el año 2022 a nivel nacional el rendimiento fue de 1.08 t/ha en una superficie cosechada de 36 605 ha. Para el mismo año los datos de rendimiento de maíz suave en choclo fueron de 3, 22 t/ha y una superficie cosechada de 13 772 ha, indicando que en la región Sierra se obtuvo una producción de 38 858 (t) con un rendimiento de 1,08 t/ha; mientras que, para el maíz suave en choclo una producción de 44 321 (t) con 3, 23 t/ha (ESPAC, 2022).

4.1.4. Fenología y crecimiento

En la Figura 1 se indica la escala de del ciclo fenológico del cultivo de maíz (Ritchie y Hanway, 1982).

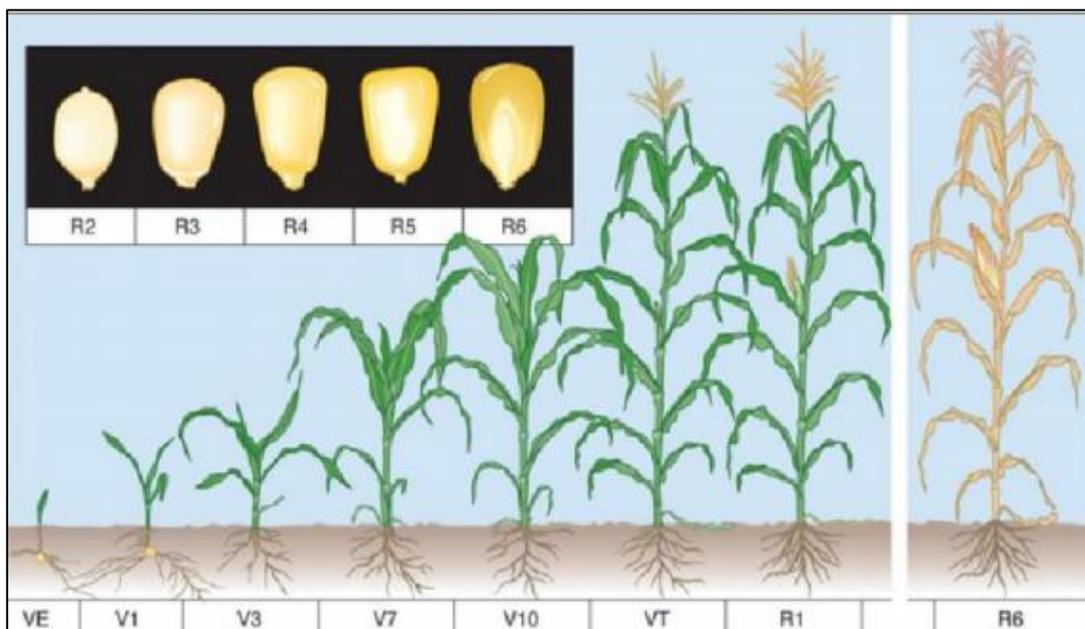


Figura 1. Fases fenológicas del maíz según Ritchie y Hanway, (1982).

Según menciona Ciampitti et al. (2016) la fase vegetativa se encuentra identificada con la letra V y un subíndice que indica la aparición de cada hoja hasta la última hoja completamente desarrollada (lígula). A continuación, se describe en la Tabla 1 la escala fenológica creada por Ritchie y Hanway, (1982), en la cual se puede visualizar la etapa vegetativa.

Tabla 1. Etapas vegetativas de cultivo de maíz (*Zea mays*)

Etapas Vegetativas	
(VE)	Emergencia
(V1)	Primera hoja
(V2)	Segunda hoja
(V3)	Tercera hoja
(Vn)	“n” enésima hoja
(VT)	Panojamiento

4.1.4.1. Estados vegetativos.

- **Emergencia (VE)**

Existe una emergencia de tipo “hipógea”, esta semilla necesita para su germinación dos componentes que es agua en 30 % de su peso y oxígeno. Una vez que esta semilla tiene los recursos necesarios el mesocotilo empieza alargarse y la punta del coleóptilo aparece en la superficie del suelo, siendo esta la etapa de emergencia.

- **Etapas vegetativas tempranas**

El desarrollo de estas etapas vegetativas tempranas empieza desde la V1 hasta V5, generando una mínima elongación del tallo al tener temperaturas del suelo necesarias para este proceso. El punto de crecimiento de la planta se encuentra bajo la superficie del suelo (antes V5) y empieza la formación de brotes de mazorca y las hojas en esta etapa.

- **Etapas vegetativas intermedias**

Desde la etapa V6 hasta la V11 las plantas inician el procesos de elongación y el punto de crecimiento se desplaza hacia la parte de arriba de la superficie del suelo. En esta etapa la planta empieza a sufrir diversos daños por causa de los factores climáticos y el punto de crecimiento se ve afectado, teniendo como consecuencias lesiones en la planta.

- **Etapas vegetativas tardías**

En este periodo la longitud de la mazorca se da desde V12 a VT, con la finalidad de conocer número de granos por hilera antes del desarrollo de las panojas. Se debe tomar en cuenta que en estas etapas vegetativas tardías puede verse afectada por el estrés reduciendo el número de granos producidos en cada hilera; sin embargo, se debe tomar en cuenta que antes y después de la polinización se determina el número total de granos.

- **Etapas de transición**

Esta etapa es un período importante para determinar el rendimiento de grano desde VT a R1. En este punto, brote de la mazorca es dominante. La fase de panojamiento ocurre cuando aparece la última rama de la panícula y se extiende hacia afuera. Empieza el R1 cuando la panícula ha emergido por completo con los estigmas visibles arriba, obteniendo una máxima altura de la planta.

4.1.4.2. Estados de Crecimiento.

El desarrollo de estas etapas reproductivas se caracteriza por aparición de granos en la mazorca. Se identifica con la letra R y un subíndice que va de 1 a 6, que son las etapas en las que se divide esta fase. En la Tabla 2 creada por Ritchie y Hanway, (1982), se puede visualizar la reproductiva.

Tabla 2. Etapas reproductivas de cultivo de maíz (*Zea mays*)

Etapa Reproductiva	
(R1)	Emergencia de estigmas
(R2)	Grano en ampolla
(R3)	Grano lechoso
(R4)	Grano pastoso
(R5)	Grano dentado
(R6)	Madurez fisiológica

- **Emergencia de estigmas (R1)**

Esta etapa se considera floración, cuando los estigmas que cubren las espigas son visibles fuera de las hojas. Después del proceso de polinización, se forma un tubo polínico, y estigma crece hasta el óvulo en aproximadamente 24 horas, una vez que ocurre la fertilización en el óvulo se produce el grano.

- **Grano en ampolla (R2)**

El grano en ampolla empieza cuando ocurre la fecundación de los óvulos, es decir, de 10 a 14 días después de haber culminado la aparición de los estigmas. En esta etapa una de las características importantes, es que el grano contiene un 85 % de humedad, debido a que el endospermo presenta un color claro al igual que el fluido interno. Con el transcurso que están van expandiéndose las glumas cada vez son menos notable.

- **Grano lechoso (R3)**

Los granos comienzan a mostrar un color blanco, amarillo o naranja amarillento, de acuerdo a cada variedad. Los granos contienen alrededor de un 80 % de humedad, considerando un

porcentaje óptimo para su consumo como choclo y el líquido interior presente en el grano es blanco lechoso por el almidón.

- **Grano pastoso (R4)**

Después que se da inicio a la aparición de los estigmas comienza a darse el grano pastoso teniendo un 70 % de humedad, y formando el líquido que se encuentra adentro en una masa, tomando en consideración que aquí se llega a mirar su color final (blanco, rosa, rojo claro o rojo oscuro) dependiendo de cada variedad.

- **Grano dentado (R5)**

Cada grano tiene una capa exterior de almidón, contienen una humedad de un 55 %. A medida que el grano con almidón es más suave comienza a perder humedad y a encogerse, formando una grieta en la superficie del grano, lo que indica el dentado de los granos.

- **Madurez fisiológica (R6)**

Después de la aparición de los estigmas que se da a los 60-65 días, este estado logra obtener una mayor acumulación de materia seca, presentando un promedio 35 % de humedad en sus granos, por ende, se consideran fisiológicamente maduros y un 60 % en la planta, Esta fase es importante porque nos permite obtener el rendimiento del cultivo

4.2. Modelos de simulación

4.2.1. Importancia de uso y aplicaciones

Los modelos de simulación empezaron a tener importancia en la agronomía, debido a que son una herramienta tecnológica que permite tomar decisiones para llevar a cabo la adaptación a los cambios climáticos que afectan la productividad agrícola, a través de este modelo se podría mejorar la producción (Figuerola et al., 2020).

Estos modelos de cultivo permiten desarrollar estrategias de producción para la toma de decisiones tácticas, que nos generen un buen desarrollo del cultivo; así también, permiten evaluar las relaciones multidimensionales entre los diferentes factores que afectan a los cultivos como es la fecha de siembra, suelo, fertilización, selección de cultivares, riego y los patrones meteorológicos estacionales. A través de este software se simula el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos, considerándose un aplicación importante en la agricultura porque toma en cuenta factores como suelo-planta-atmosfera (Ovando et al., 2017).

Su empleo está enfocado en comprender mejor los problemas y anticipar la realidad permitiendo analizar las actividades agropecuarias para mitigar los efectos del cambio climático en cada zona o región (Hernández et al., 2009).

4.2.2. Tipos de modelos

En el campo agronómico existen dos tipos de modelos de simulación que son los mecanísticos que tienen la finalidad de mirar el comportamiento biológico, mientras que, los modelos empíricos se centran en las relaciones matemáticas entre datos. Los modelos predictivos o también llamados empíricos se basa en la individualización a partir de los datos experimentales que han sido desarrollados con la utilización de ecuaciones de regresión matemáticas. Este tipo de modelo no toma en consideración la aplicación de fertilizantes, el área de la hoja en relación con el número de hojas totales por planta, así como también la altura, número y diámetro de tallo etc. y no los procesos fisiológicos de la planta. Estos modelos son sencillos pero no pueden ser mejorados ni ser analizados más a fondo de las condiciones en las que fueron elaborados (Castro y Hétier, 2015).

Los modelos causales o mecanicistas se basan en describir los procesos fisiológicos, físicos, químicos y el efecto de los factores ambientales en el crecimiento del cultivo. Existen diferentes aspectos que se toma en cuenta en este tipo de modelo: temperatura, radiación fotosintéticamente activa, índice de área foliar, fotosíntesis, respiración y radiación. Este modelo describe como la naturaleza podría incidir en el desarrollo de las plantas y conocer predicciones que relacionan las variables independientes y dependientes en relación con el efecto del cambio climático. Una de sus principales desventajas es que necesita una diversidad de datos para su calibración y validación(Castro y Hétier, 2015).

4.2.3. DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer CERES-Maize*)

Este programa DSSAT es una plataforma de 42 modelos, se ha utilizado para diversos propósitos que van desde la gestión de cultivos a nivel de parcela, la evaluación del cambio climático regional, el análisis de riesgos, la planificación de operaciones agrícolas. En esta plataforma se encuentra el modelo CERES-Maize (*Comprehensive Crop Environmental Resources*), es un modelo que necesita tener partes mecanicistas y empíricas, cuyo objetivo es simular el desarrollo fenológico, el crecimiento y el rendimiento del maíz, y es un modelo de simulación multifuncional que se puede utilizar para la toma de decisiones agrícolas (Castro y Hétier, 2015).

El modelo CERES-Maize calcula el desarrollo fenológico, crecimiento, desarrollo y parámetros productivos. En este modelo cuando el agua y el nitrógeno no limitan el crecimiento de la planta, la simulación estuvo influenciada por la radiación solar incidente diaria, temperatura máxima y mínima y precipitaciones, tomando en cuenta factores específicos de la variedad utilizada (coeficiente genético) y métodos de cultivo (fecha de siembra, densidad de

plantas, espacio entre hileras). Al igual que todos los modelos incluidos en el software DSSAT, este modelo de cultivo también puede simular el desarrollo y crecimiento de cultivos en ambientes con limitaciones de agua y nitrógeno cuando el equilibrio agua-nitrógeno está habilitado (Castro y Hétiér, 2015).

4.2.4. Datos requeridos por el modelo

Jones et al (2003), el sistema de soporte de decisiones para la transferencia de agrotecnología (DSSAT) para su desarrollo inicial estuvo motivado por la necesidad de integrar conocimientos sobre suelo, clima, cultivos y manejo para tomar mejores decisiones sobre la transferencia de tecnología de producción de un lugar a otro donde los suelos y el clima diferían.

4.2.4.1. Clima.

Requiere altitud y longitud de la estación climática y valores diarios de radiación solar ($\text{MJ/m}^2\text{-día}$), temperatura máxima y mínima ($^{\circ}\text{C}$), precipitación total diaria (mm), humedad relativa (%), velocidad del viento (km/hora), CO_2 (vpm) y horas día de la localidad donde se va realizar las simulaciones (Fernández, 2013).

4.2.4.2. Suelo.

Recopilación de parámetros físicos, químicos y constantes hidrofísicas del perfil del suelo por cada horizonte: profundidad del horizonte (cm), porcentaje de contenido de arena (Ar %), limo (Lo %) y arcilla (Ar %), densidad aparente (g cm^{-3}), barra de 1/3, carbono orgánico (%), pH, color, saturación de aluminio, factor de crecimiento de las raíces, (Fernández, 2013).

4.2.4.3. Manejo del cultivo.

Necesita información sobre la fecha, densidad y profundidad de siembra, distancia entre hileras, variedad de cultivo, riego, tipo y espacio de drenaje y las prácticas de fertilización (Fernández, 2013).

El modelo CERES-maize, requiere información de seis coeficientes genéticos: P1: Tiempo térmico desde la emergencia hasta el final de la etapa juvenil (días-grado, temperatura base superior de 8°C); P2: Grado de retraso en el desarrollo (expresado en días) por cada hora adicional de incremento en el fotoperiodo; P5: Tiempo térmico desde la floración femenina hasta la madurez fisiológica (expresado en días-grado sobre una temperatura base de 8°C); G2: Número máximo de granos por planta; G3: factor de llenado de grano (mg/día)(Fernández, 2013).

4.3. Modelos del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) con la finalidad de conocer los posibles efectos del cambio climático y sus futuros riesgos, buscando alternativas de adaptación para contrarrestar sus daños, crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático en el año 1988. Este grupo es el encargado de dar a conocer a través de distintos informes científicos sobre como se están dando las variaciones del cambio climático, basándose en tres grupos principales: Un grupo es el encargo de analizar los cambios climáticos físicos, el otro grupo, mira los impactos y efectos que se dan a través de estos cambios y mirar los efectos que causan en las personas y en los ecosistemas. El grupo tres, busca detener o reducir los efectos negativos del CC, mirando posibles soluciones de mitigación y adaptación (IPCC, 2023).

4.3.1. Proyecto de intercomparación de modelos acoplados

El Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP) fue desarrollado en 1995 por el Grupo de Trabajo sobre Modernización Acoplada del programa Mundial de Investigación Climática, para comprender las constantes variaciones del cambio climático, que se da por la variabilidad natural a lo largo de periodos históricos y proyecciones futuras, es decir, comprende como va evolucionando los efectos del CC (pasado, presente y futuro) (Chávez, 2021).

Por otro lado, Chávez (2021) indica que estos modelos de circulación general son una herramienta disponible computacional avanzada, para simular la respuesta de un sistema global al tener un incremento de emisiones de gases de efecto invernadero buscando alternativas para minimizar los efectos negativos a través de prácticas sostenibles y amigables con el medio ambiente.

4.3.2. Modelos de circulación general

En estos modelos de circulación general se toma en cuenta dos fases del CMIP, que con el transcurso del tiempo se han ido desarrollando y modernizado en la modelización del clima de forma global:

- **CMIP Fase 5 (CMIP5)**

Esta fase es responsable de evaluar y comprender qué mecanismos contribuyen a las diferencias entre modelos en condiciones deficientes, como comprender las reacciones del ciclo del carbono y examinar la previsibilidad del clima, a través de la utilización de estos programas que nos ayuda a predecir el clima en escalas de tiempo decenales y, de manera más general. Su

finalidad es conocer las estimaciones del cambio climático futuro y sus consecuencias, para buscar y determinar alternativas que nos permita mejorar y mitigar el CC (Chávez, 2021).

- **CMIP Fase 6 (CMIP6)**

La estructura de esta fase se ha ampliado con respecto a la fase 5, recopilando, organizando y distribuyendo resultados de los modelos que realizan conjuntos comunes de experimentos.

Esta fase menciona una descripción, diagnóstico, evaluación y caracterización del clima (DECK), lo que permite identificar partes importantes que ayudan a recopilar información de las propiedades básicas del modelo durante la fase CMIP (Chávez, 2021).

5. Metodología.

5.1. Localización del estudio

La presente investigación tiene como propósito la validación del modelo de cultivo DSSAT CERES–Maize. Este trabajo se realizó bajo condiciones ambientales de la Quinta Experimental y Docente La Argelia, perteneciente a la Universidad Nacional de Loja ubicado en la parroquia San Sebastián. La zona de estudio presenta una latitud de 4° 3` 75`` Sur, la longitud es de 79° 20` 34`` Oeste, a una altitud de 2138 m.s.n.m. (Figura 2). Esta área donde se realizó la investigación presenta una temperatura media de 16.4 °C, precipitaciones de 1096 mm anuales y una humedad relativa del 75 % promedio año.

Su clasificación climática es Cfb según Koppen Geiger, lo cual significa un clima cálido y templado con temperatura promedio de 16.1 °C, precipitación promedio anual de 1089.3 mm y humedad relativa de 77,5 % (Rubel y Kottek, 2010).

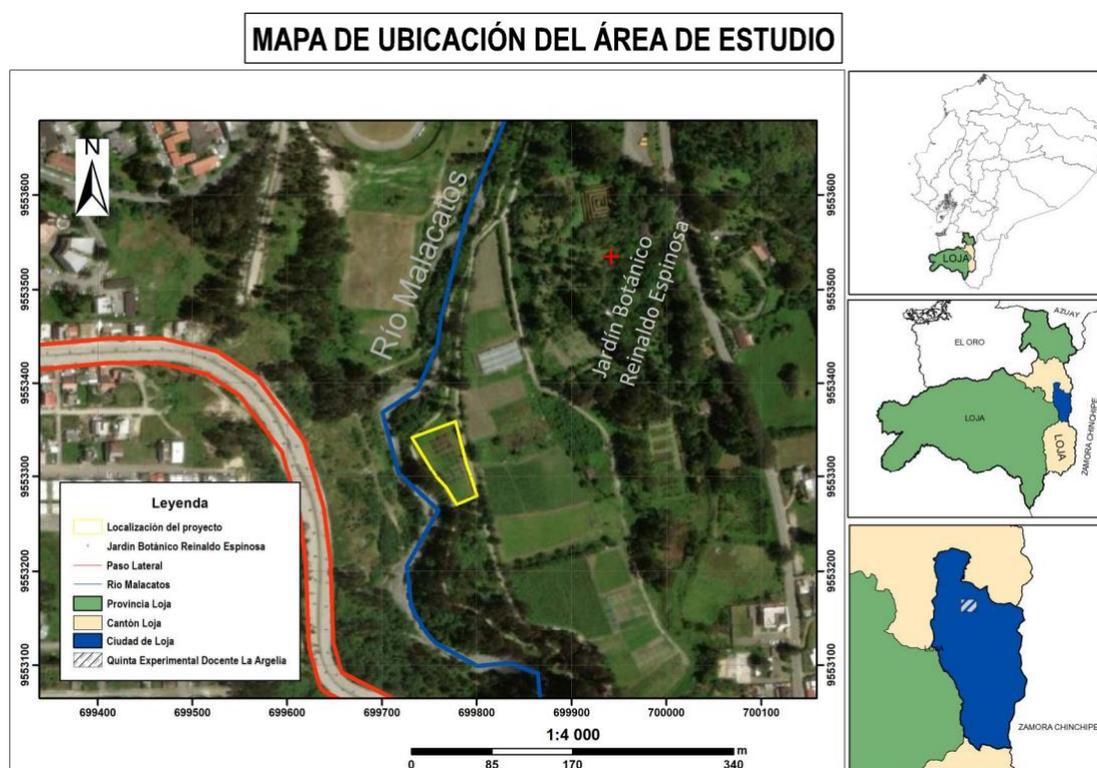


Figura 2. Localización de la zona de estudio donde realizaron los ensayos de campo, ubicado en la Quinta Experimental Docente la Argelia, perteneciente a La Universidad Nacional de Loja.

5.2. Metodología general

5.2.1. Tipo y alcance de la investigación

La investigación es de tipo predictivo porque tiene como propósito prever o anticipar situaciones futuras del comportamiento agronómico del maíz blanco. Así mismo posee un enfoque mixto, es decir, una combinación entre lo cualitativo y cuantitativo. La investigación

cuantitativa se centra en datos numéricos, que en este trabajo se relacionan con la recopilación de información fenológica y morfológica existente sobre el maíz blanco, así como los parámetros físico-químico del suelo y los datos meteorológicos diarios de la zona de estudio. Por otro lado, la investigación cualitativa, no utiliza datos numéricos, permite utilizar y analizar datos para comprender experiencias y comportamiento futuro de la producción de maíz blanco en la Argelia Loja. Por otro lado, este proyecto no tiene diseño experimental, es decir, sin manipulación de las variables, ya que se usarán datos agronómicos de trabajos previos, ya concluidos.

5.3. Metodología para el primer objetivo

“Validar el modelo de simulación de cultivo DSSAT CERES–Maize en maíz INIAP-103 “Mishqui Sara” bajo las condiciones ambientales de la Argelia Loja”

El modelo de cultivo CERES-Maize (Jones et al., 2003) para su validación requiere de los siguientes parámetros:

5.3.1. Base de datos del suelo

Se construyó una calicata de 150 cm de profundidad y se realizó en el Laboratorio de Bromatología, Suelos y Agua de la UNL, análisis de parámetros físicos y químicos del suelo donde se realizó los ensayos de campo, en el que se determinó textura (% de arcilla, % de limo y % de arenas), contenido de carbono, contenido de materia orgánica, color del suelo y pH. Además, se determinó constantes hidrofísicas como % de saturación, % de humedad a 1/10, punto de marchitez permanente (PMP) y densidad aparente.

5.3.2. Base de datos del clima

Se utilizó datos diarios de temperatura mínima, media y máxima (°C), precipitación (mm) y radiación solar incidente (MJ/m² día⁻¹). Estos datos se obtuvieron de la estación meteorológica La Argelia, perteneciente al Instituto Nacional de Metrología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) que se encuentra instalada en la Universidad Nacional de Loja. El periodo de datos obtenidos es desde el 1 de noviembre del 2020 hasta el 31 de julio del 2021.

5.3.3. Base de datos del cultivo

Los datos de calibración fueron tomados de Calva y Capa (2018), donde utilizaron dos tipos de siembra 3 semillas y 1 semilla por golpe con una densidad de 70000 y 62500 plantas por hectárea. Por otro lado, los datos agronómicos del cultivo para la validación se obtuvieron de Macas y Capa (2021), donde se evaluó diferentes niveles de fertilización nitrogenada (3 niveles) que van desde 0 % (0 kg N/ha) 50 % (40 kg N/ha) y 100 % (80 kg N/ha), sobre parámetros de crecimiento y productivos en la variedad INIAP-103 “Mishqui Sara”. Este trabajo se realizó en seco (sin riego), con una densidad de siembra de 62500 plantas /ha con un marco de

plantación de 0.20 cm entre planta por 0,80 cm entre surco, sembrado a una semilla por golpe, tomando en cuenta que lo que vario de acuerdo al tratamiento es la fertilización nitrogenada.

5.3.4. Validación del modelo

El programa DSSAT necesitó ser calibrado y validado para poder realizar las simulaciones del cultivo de maíz a determinados factores. Para su validación el programa fue cargado con 4 componentes importantes: clima, suelo, genotipo y manejo para poder ser validado correctamente. La validación se realizó modificando los coeficientes genéticos: P1, P2, P5, G2, G3 y PHINT. El coeficiente P1 nos indican el tiempo térmico desde emergencia hasta el final de la etapa juvenil (expresado en días-grado por encima de una temperatura base de 8 ° C); P2 es el grado de retraso en el desarrollo (expresado en días) por cada hora adicional de incremento en el fotoperiodo, P5 es el tiempo térmico desde la floración femenina hasta la madurez fisiológica (expresado en días-grado sobre una temperatura base de 8 ° C), G2 es el número máximo de granos por planta, G3 es la factor de llenado de grano (mg grano⁻¹ d⁻¹) y PHINT son los grados día con base 8 °C entre la aparición de cada hoja. Luego de modificar cada coeficiente genético se realizó en menor ajuste posible entre los observado en campo y simulado a la fenología (fecha de emergencia, anthesis y madurez fisiológica), rendimiento, % de Nitrógeno en grano e índice de área foliar.

5.3.5. Análisis estadísticos

5.3.5.1. Error cuadrático medio (porcentaje).

Para determinar el ajuste entre los valores simulados y observados en campo, se utilizó la siguiente fórmula:

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum_1^n ((Y_{obs} - Y_{sim})/Y_{obs})^2}{n}} \times 100$$

Donde

Y observado = rendimiento observado

Y simulado =rendimiento simulado

n = número total de datos

Según Rodríguez et al.(2021) mencionan que si simulación realizada por el modelo presenta un RMSE normalizado menor al 10 % , se considera como excelente, porcentajes superiores a 10% pero menores que 20 %, es bueno, si el RMSE es mayor que 20 % y menor 30 % se considera como justo y mayor al 30 % es deficiente.

5.4. Metodología para el segundo objetivo

“Analizar el efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) INIAP-103 “Mishqui Sara” en el sector la Argelia Loja”

Para el desarrollo de este objetivo, se utilizó el modelo validado, que nos permitió obtener el menor error posible entre los valores simulados y observados en campo, especialmente en el parámetro de rendimiento (t/ha). Se consideró el mismo suelo, genotipo y manejo agronómico, establecido en el objetivo anterior. Para las simulaciones futuras en el parámetro de rendimiento de maíz blanco bajo condiciones de clima futuro se usó proyecciones de variables climáticas diarias (Radiación, Tmax, Tmin y precipitación) basadas en 5 modelos climáticos globales (GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, UKESM1-0-LL), en 3 escenarios (trayectorias socioeconómicas compartidas, SSPs: ssp126, ssp 370 y ssp585) para dos periodos futuros (2050 y 2100). Para el periodo 2050, se realizó el promedio del periodo 2041-2060, mientras que, para el periodo 2090, se promedia el rendimiento del periodo 2081-2100. Estos datos fueron obtenidos de The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP, 2024) en el siguiente link: https://data.isimip.org/sea_rch/page/2/tree/ISIMIP2b/tree/ISIMIP3b/InputData/climate/atmosphere/esm4/ssp370/tasmin/tree/ISIMIP3b/InputData/climate/atmosphere/gfdl-esm4/ssp370/rsds/all/true/.

Las simulaciones totales realizadas fueron de 15 combinaciones (5 modelos*3 escenarios para cada periodo). ISIMIP incluye conjuntos de datos de entrada de clima ajustados por sesgo en una cuadrícula global de 0.5°x 0.5° de latitud y longitud y en pasos de tiempo diarios, así como datos socioeconómicos para las proyecciones futuras (Frieler et al., 2024).

5.4.1. Modelo de predicción

Se usó el modelo eco fisiológico DSSAT Ceres-Maize, previamente calibrado y validado, para simular el rendimiento futuro usando las 15 combinaciones de clima futuro en cada periodo 2050 y 2100. Una vez simulados los rendimientos futuros se realizó un análisis comparativo con los rendimientos actuales para determinar el efectos positivo o negativo del cambio climático en la productividad de maíz blanco bajo condiciones del sector la Argelia.

6. Resultados.

6.1. Validación del modelo DSSAT CERES-Maize

6.1.1 Propiedades físicas y químicas del suelo

La Tabla 3 muestra los resultados del análisis de suelo, obtenidos del Laboratorio de Bromatología, Suelos y Agua de la UNL. En las parcelas experimentales donde se realizaron los ensayos maíz se identificaron 5 horizontes, predominando la textura franca en cada uno de ellos. Además, el primer horizonte (primeros 15 cm de profundidad) se caracterizó por presentar valores promedios de 0,88 % de carbono orgánico (CO) y 1,66 % de materia orgánica (MO), considerándose un suelo con bajo contenido de materia orgánica (inferior a 2 %).

Tabla 3. Características físico – químicas del perfil del suelo de las parcelas donde realizaron los ensayos de maíz blanco en la Quinta Experimental Docente La Argelia.

Profundidad	% Ar	% Lo	%Ac	CO	MO	Textura	Color del suelo
0cm- 15cm	40.36	40.36	19.28	0.88	1.66	Franco	Marrón oliva
15cm – 40cm	46.36	34.36	19.28	0.55	1.04	Franco	Marrón oliva
40cm -75cm	38.36	46.36	15.28			Franco	Marrón oliva claro
75cm -120cm	20.36	52.36	27.28			Franco arcilloso	Marrón oliva claro
120cm – 150cm	30.36	44.36	25.28			Franco	Marrón oliva claro

%Ar: Arena, **%Lo:** Limo y **% Ac:** Arcilla, **CO:** Carbono orgánico, **MO:** Materia orgánica.

Las constantes hidrofísicas de los diferentes horizontes del suelo se observa en la Tabla 4, donde se determinó que en esta área donde realizaron los experimentos de maíz blanco son suelos con alto porcentaje de saturación y humedad, con una densidad aparente de 1,46 g/cm³ en el primer horizonte, indicando que el suelo tiene problemas de retención de agua, debido a la alta compactación y aireación deficiente e infiltración lenta de agua. Mientras que, en el cuarto horizontes con 1,20 cm de profundidad, disminuye a 1,26 g/cm³, dando a conocer que este horizonte es bien aireado con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo radicular.

Tabla 4. Constantes hidrofísicas del perfil del suelo de las parcelas donde realizaron los ensayos de maíz blanco en la Quinta experimental Docente La Argelia.

Profundidad	% Saturación	% Humedad		PMP	Densidad
		a 1/10	a 1/3		Aparente (g/cm ³)
0cm- 15cm	30.82	23.92	18.96	4.26	1.46
15cm – 40cm	24.46	19.74	17.79	4.10	1.59
40cm -75cm	31.76	26.91	20.32	3.22	1.44
75cm -120cm	38.66	34.06	31.48	6.34	1.26
120cm – 150cm	25.94	22.40	19.71	5.48	1.53

PMP: Punto de marchitez permanente (% Humedad a 15 atm.)

6.1.2. Base de datos de climáticos

El promedio climatológico de 24 años (1990-2013) de la zona de estudio, muestra temperaturas promedio de 16,6 °C, con mínima de 11,9 °C y máxima de 21,4 °C. Los periodos donde se realizaron los ensayos de maíz en campo para los años 2018/2019 donde se realizó la calibración presentaron temperaturas medias de 17,2 °C, con mínimas de 12,6 y máxima de 21,8 °C indicando que fueron superiores a los promedios de los años 2020/2021 donde se realizó la validación obteniendo un promedio 16,5 °C, con mínimas de 12,5 °C y máximas de 20,5 °C (Figura 3A). En relación a la precipitación, la zona de estudio se caracteriza por presentar lluvias de 720 mm por ciclo de cultivo (periodo 1990-2013), mientras que, cuando se realizaron los ensayos para la calibración las precipitaciones fueron ligeramente mayores (782 mm). Pero en el periodo donde se realizó la validación la lluvia fue inferior (677 mm), teniendo altas precipitaciones en el mes de marzo (273.2 mm/mes) (Figura 3B). En la radiación se determinó que esta variable climatológica para los años 1990-2013 presentó un promedio de 15.96 MJ/m² día considerándose valores altos con referencia a los obtenidos en la calibración con un promedio de 14,42 MJ/m² y en la validación de 13,40 MJ/m² (Figura 3C).

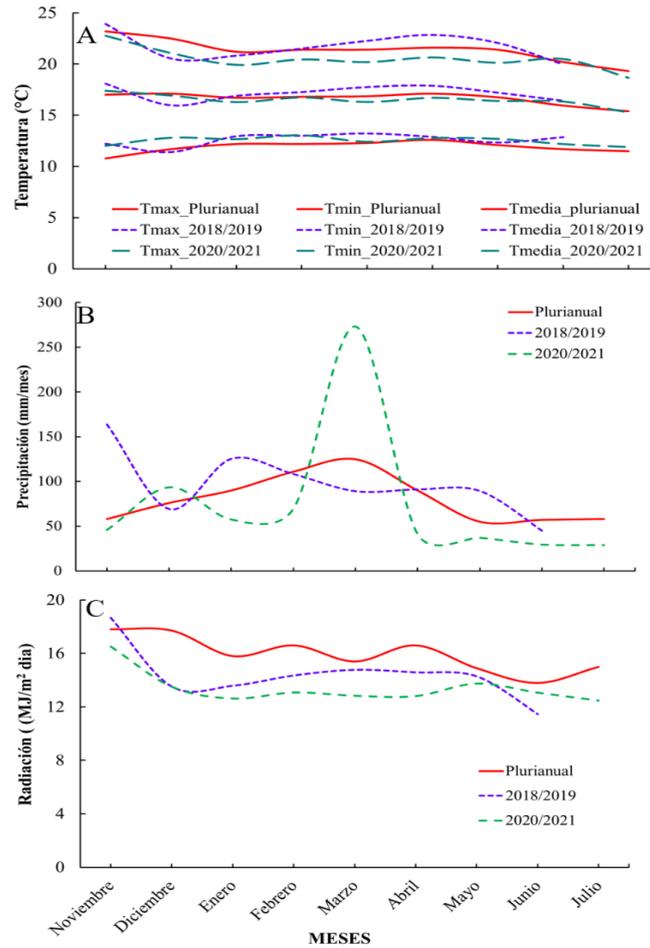


Figura 3. Climatología de la estación meteorológica La Argelia: A) Temperatura máxima, media y mínima (Tmax, Tmedia y Tmin); B) Radiación; C) Precipitación para diferentes periodos de cultivo (noviembre 2018-junio 2019, noviembre 2020 -julio 2021 y climatología plurianual (1990-2013).

6.1.3. Coeficientes genéticos calibrados y validados

La calibración y validación se realizó utilizando seis coeficientes genéticos (P1, P2, P5, PHINT, G2 y G3). En los resultados se determinó que esta variedad de maíz necesita 255,0 °C desde la emergencia hasta llegar a su etapa juvenil (P1) y requiere de 820 °C durante el llegado de grano (P5), presentando un promedio de 420 granos por planta (G2) con una tasa de desarrollo promedio de 9 mg/día (G3) y requiriendo 68,30 °C para el crecimiento de cada hoja (PHINT).

Los coeficientes genéticos de la variedad de maíz INIAP 103 “Mishqui Sara” que más se ajustaron a los parámetros de fenología y rendimiento simulados por el modelo CERES-Maíz, se muestra en el Tabla 5.

Tabla 5. Valores de coeficientes genéticos de maíz variedad INIAP 103 “Mishqui Sara” que se ajustan a la fenología y crecimiento del modelo CERES-Maize.

Cultivar	P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
INIAP-103	255.0	0.0	820.0	420.0	9.00	68.30

P1: tiempo térmico desde emergencia hasta el final de la etapa juvenil; **P2:** sensibilidad al fotoperiodo; **P5:** tiempo térmico desde la floración hasta la madurez fisiológica; **G2:** Número máximo de granos por planta; **G3:** tasa potencial de crecimiento de los granos; **PHINT:** grados día entre la aparición de cada hoja.

La validación del modelo CERES-Maize propuesta en este estudio nos permitió realizar una comparación de los valores simulados con los observados en los experimentos realizados en campo del cultivo de maíz *Zea mays* variedad INIAP 103 “Mishqui Sara” en los periodos 2018-2019 y 2020-2021 (Tabla 6). En cuanto a la antesis, se obtuvo un RMSEP = 0,90 % en la calibración y 0,85 % en la validación lo que significa que el modelo predice adecuadamente esta fase. En la fase de madurez fisiológica (cosecha) el modelo CERES-maíz predijo razonablemente un RMSEP= 6,22 % en la calibración y 5,97 % en la validación.

Sin embargo, el modelo no predijo de manera exacta los valores observados y simulados en la fase de emergencia, teniendo un error absoluto medio de 6 días entre lo observado y simulado. La calibración de la emergencia presentó un RMSEP= 46,02 %, mientras que para la validación existió un error absoluto medio de 4 días con un RMSEP 33,33 %.

Tabla 6. Validación de la fenología de la variedad de maíz variedad INIAP 103 “Mishqui Sara”.

	Calibración (2018-2019)					Validación (2020-2021)				
	Observado	Simulado	MAE	RMSEP (%)	RMSE	Observado	Simulado	MAE	RMSEP (%)	RMSE
Siembra	9/11/18	9/11/18	0	0	0	27/11/2020	27/11/2020	0	0	0
DDS	0	0				0	0			
Emergencia	21/11/18	15/11/18	6	46,02	6,08	8/01/2021	4/01/21	4	33,33	4
DDS	13	7				12	8			
Antesis	28/02/19	27/02/19	1	0,90	1	23/04/21	22/04/21	1	0,85	1
DDS	111	110				117	116			
Cosecha	6/06/19	24/05/19	13	6,22	13	16/07/21	4/07/21	-12	5,97	12
DDS	209	196				201	213			

MAE= Error absoluto medio; RMSEP= Error cuadrático medio (%); RMSE= Error cuadrático medio

En la Tabla 7 se observa que el modelo simuló con mayor exactitud en el parámetro de rendimiento en la calibración y validación teniendo un RMSEP excelente con valores de (5,56

% y 8,96 %), con un error absoluto medio de -250 kga/ha (calibración) y 493 kg/ha (validación) entre lo observado y simulado. Mientras que, para los parámetros de IAF y Nitrógeno en el grano el RMSEP no predijo de manera satisfactoria obteniendo valores muy lejanos a lo observado en campo, mostrándonos valores superiores al 27 % en la calibración y superiores al 16 % en la validación.

Tabla 7. Validación del rendimiento, IAF y % N en el grano de la variedad de maíz INIAP 103 “Mishqui Sara”.

	Calibración (2018-2019)					Validación (2020-2021)				
	Observado	Simulado	MAE	RMSEP (%)	RMSE	Observado	Simulado	MAE	RMSEP (%)	RMSE
IAF (m² /m²)	2,15	1,55	0,6	27,55	0,63	1,90	1,43	0,205	17,94	0,38
N (%)	1,06	1,70	-0,64	61,21	0,65	1,41	1,37	0,035	16,45	0,24
Rend (kg/ha)	5073	5324	-250	5,56	291,6	5123	4290	493	8,96	511,68

MAE= Error absoluto medio; RMSEP= Error cuadrático medio (%); RMSE= Error cuadrático medio

6.2. Efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) INIAP-103 “Mishqui Sara”

6.2.1. Rendimiento

A partir de las simulaciones bajo diferentes escenarios de emisiones de Gases de Efecto invernadero (ssp126, ssp370 y ssp585), el rendimiento promedio en maíz blanco INIAP-103 “Misqui Sara”, aumentará un 2,14 % en el escenario ssp126 (bajas emisiones de CO₂), mientras que, para los dos escenarios siguientes se prevé una reducción de 14,86 % en el escenario ssp370 (emisiones medias de CO₂) y de 2,84 % en el escenario ssp585 (altas emisiones de CO₂) para el periodo 2041-2060. De igual manera, para el periodo 2081-2100, el rendimiento promedio de maíz blanco podría aumentar un 4,01 % en el ssp126, pero se proyecta una disminución de 17,65 % y 20,18 % a mayores emisiones de gases de efecto invernadero, ssp 370 y ssp585 respectivamente (Figura 4). Estos resultados indican que para los dos periodos el promedio de rendimiento en maíz aumentará al tener bajas emisiones de CO₂.

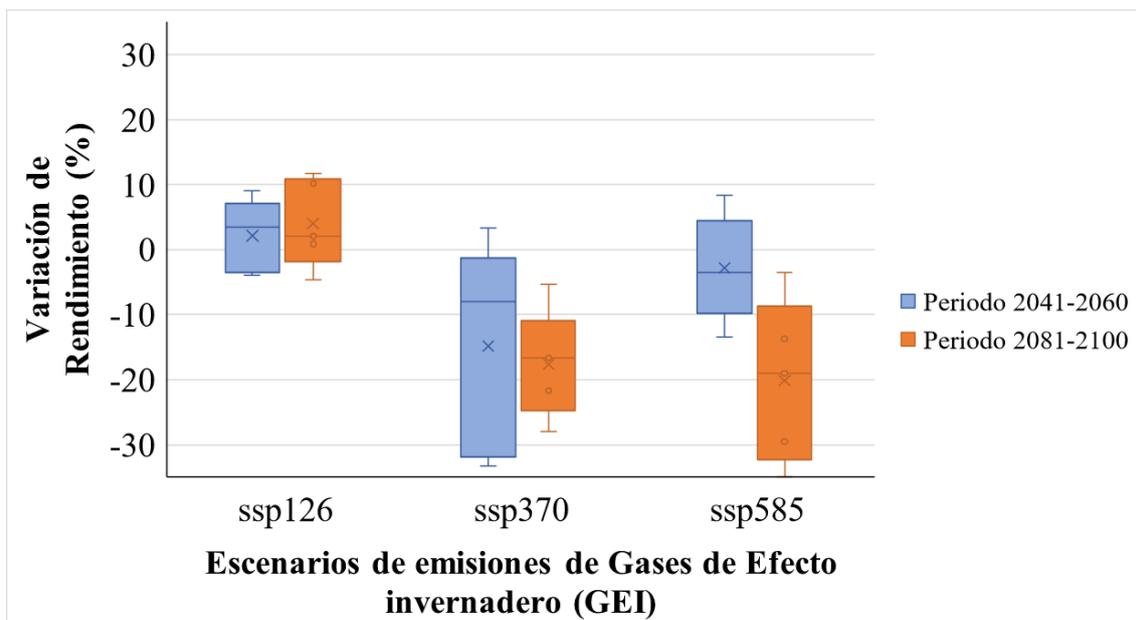


Figura 4. Proyecciones de variación de rendimiento de maíz blanco INIAP-103 “Mishqui Sara” bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero con los modelos climáticos GFDL, IPSL, MPIE, MRIE, UKES para el periodo 2041-2060 y 2081-2100.

6.2.2. Fenología

6.2.2.1. Variación siembra-antesis (fase vegetativa).

Los datos de validación permitieron determinar que el maíz blanco INIAP 103 requiere aproximadamente 116 días desde la siembra hasta la antesis. A partir de este valor de referencia se determinó que se proyecta una reducción de la fase siembra-antesis para todos los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y los dos periodos de estudio (Figura 5). Se proyecta que existirá una reducción de 22,54 %, 25,70 % y 26,12 % en el escenario ssp126, ssp370 y ssp585 respectivamente para el periodo 2041-2060. De igual manera, se observa el mismo patrón de acortamiento de la fase siembra-antesis para el periodo 2081-2100, siendo más agudizado en los escenarios ssp 370 y ssp 585 con reducciones del 33 al 36 % respectivamente.

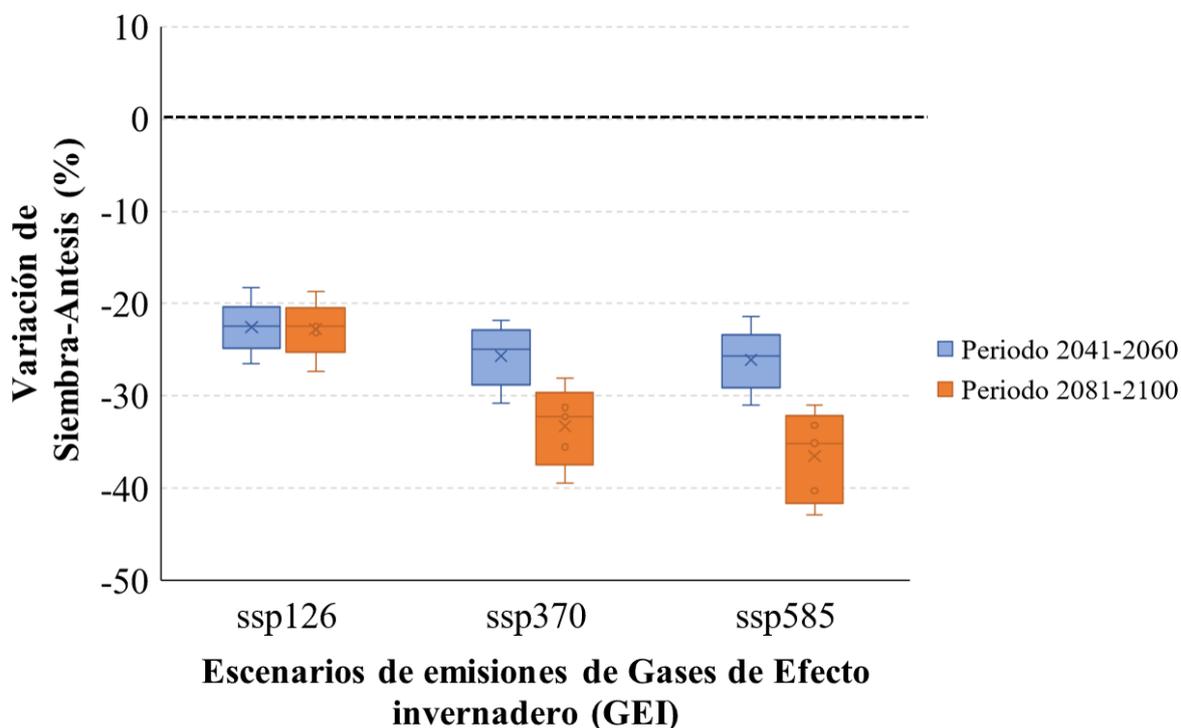


Figura 5. Proyecciones de variación del ciclo siembra-antesis de maíz blanco INIAP-103 “Mishqui Sara” bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero con los modelos climáticos GFDL, IPSL, MPIE, MRIE, UKES para el periodo 2041-2060.

6.2.2.2. Variación de la fase antesis-cosecha (fase reproductiva)

Los resultados obtenidos de la proyección de variación de la fase reproductiva (antesis-cosecha), se prevé una reducción en sus dos periodos evaluados (2041-2060 y 2081-2100). Sin embargo, en el escenario ssp126 para los dos periodos la disminución en esta fase es similar teniendo como valores máximos un 26 %. Mientras que, para el ssp370 y 585 esta disminución de la fase reproductiva será mayor acentuada con 38,27 % y 41,62 % respectivamente para el periodo 2081-2100, en comparación del periodo 2041-2060 con una disminución en su fase de 35,29 % y 30,88 % en el escenario ssp370 y ssp585 respectivamente (Figura 6).

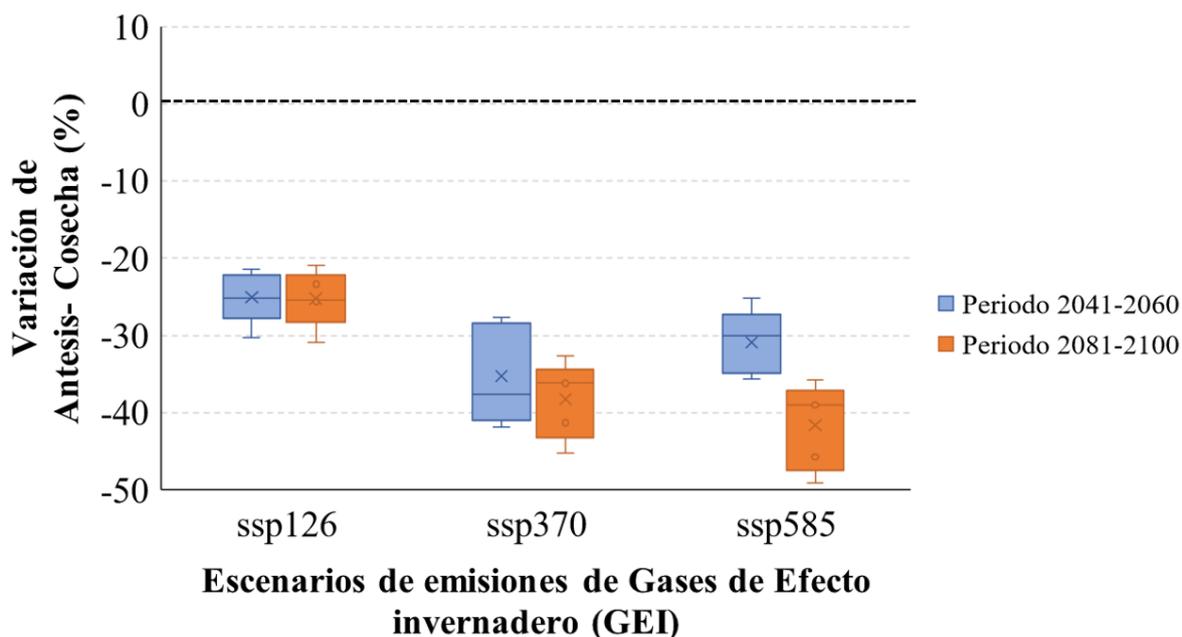


Figura 6. Proyecciones de variación del ciclo antesis-cosecha de maíz blanco INIAP-103 “Mishqui Sara” bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero con los modelos climáticos GFDL, IPSL, MPIE, MRIE, UKES para el periodo 2041-2060 y 2081-2100.

6.2.2.3. Variación del ciclo de cultivo de maíz (siembra-cosecha).

Las proyecciones de variación del ciclo del cultivo desde la siembra hasta la cosecha, indica que en el escenario con bajas emisiones de CO₂ (ssp126) existe una reducción no muy notoria en los dos periodos evaluados (2041-2060 y 2081-2100) con un promedio máximo de 25 %. Sin embargo, en los escenarios con mayores emisiones de CO₂ (ssp370 y ssp585), se observa que esta disminución va ser mucho más acentuada en el periodo 2081-2100 con un 35,6 % y de 38,8 % respectivamente, en comparación a los promedios proyectados en el periodo 2041-2060 que presenta promedios máximos de 28 y 30 % (Figura 7).

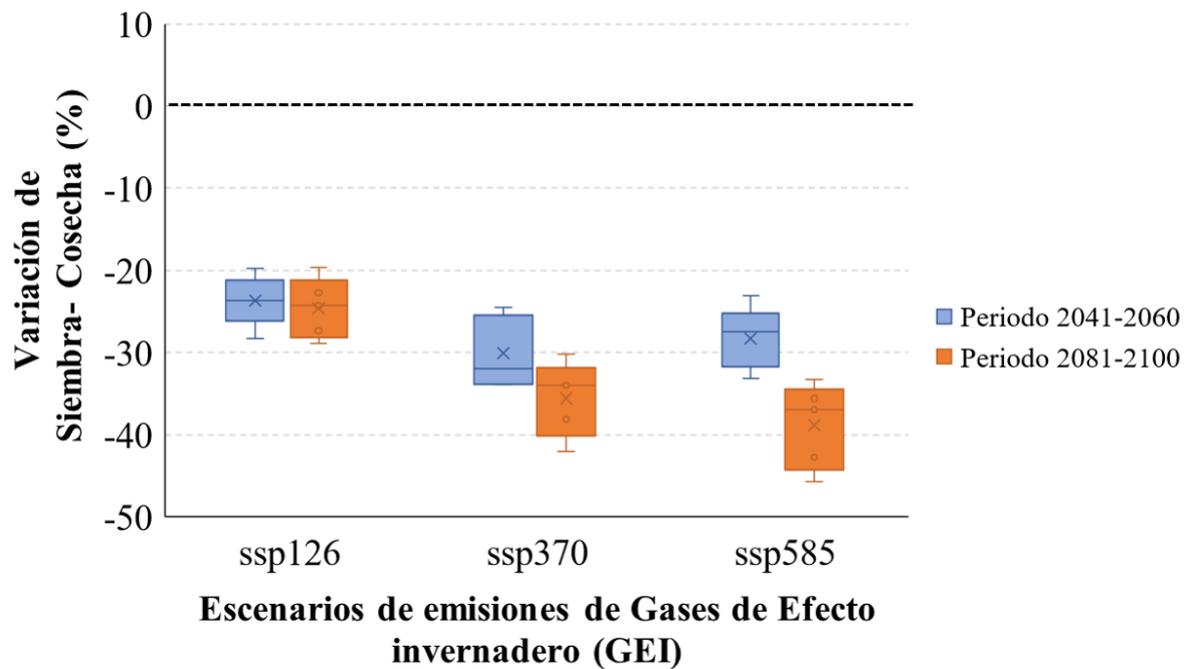


Figura 7. Proyecciones de variación desde la siembra-cosecha de maíz blanco INIAP-103 “Mishqui Sara” bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero con los modelos climáticos GFDL, IPSL, MPIE, MRIE, UKES para el periodo 2041-2060 y 2081-2100.

7. Discusiones.

La precisión del modelo de cultivo DSSAT está determinada por el grado de ajuste entre los valores observados y simulados de parámetros específicos (Lin et al., 2014). El modelo DSSAT Ceres-Maize en la duración de la fase de siembra-antesis y antesis-madurez fisiológica presentó un óptimo ajuste con los valores observados, con un RMSEP máximo de 0,90 % y 6,22 % en la calibración y validación respectivamente, lo que significa que el modelo predice excelentemente en estas dos fases fenológicas. De igual manera, el modelo de simulación tuvo un buen ajuste en el parámetro productivo de rendimiento, con un RMSEP excelente de 5.56 % en la calibración y 8,96 % en la validación. Estos resultados indican que las simulaciones de los parámetros mencionados anteriormente se encuentran en la categoría de excelente, debido a que el RMSEP es menor al 10 % (Rodríguez et al., 2021). Estudios previos han reportado la eficiencia de simulación del modelo DSSAT para el cultivo de maíz (Díaz et al., 2015; Lin et al., 2014; González et al., 2022). Según Díaz et al. (2015) indican que el modelo predice de manera excelente en la fase antesis (maíz híbrido PM-213) y rendimiento (maíz híbrido INTI 8420) con RMSE=8,54 % y 5,3 % respectivamente. Por lo tanto, este modelo es una herramienta confiable para estudios de impacto del cambio climático en la provincia de Loja. Sin embargo, el modelo utilizado en este estudio no simuló de manera exacta los valores observados en la fase de siembra-emergencia con un RMSEP mayor al 33 %. El modelo simula menos días requeridos para la germinación, indicando que los datos observados en campo mostraron promedios de 13 y 12 días, mientras que se simuló 7 y 8 días en la calibración y validación respectivamente. Según Rodríguez et al. (2021) indican que esta simulación es deficiente, debido a que se presentan valores superiores al 30 %. Sin embargo, esta disminución en los días de germinación simulados, no afectan a la fase vegetativa del cultivo.

Por otro lado, las simulaciones realizadas por el modelo en el parámetro de índice de área foliar obtuvieron un RMSEP menor al 30 %, en la validación y calibración. Varios autores han reportado RMEP altos para esta variable (Díaz et al., 2015; Amiri et al., 2022). Díaz et al. (2015) indican que el IAF presentan un RMSE=31,46 % en el híbrido; PM-213 con un 25.07 % en híbrido Inti 8420 y 41,51 % Experimental 5, considerando que presentan porcentajes deficientes. En nuestro estudio en relación al porcentaje de nitrógeno en grano se presentó un RMSE deficiente en la calibración (61,21 %) y bueno en la validación (16,45 %). Mientras que, Díaz et al. (2015) obtuvieron un RMSE de 42 % y 53 % en el híbrido PM-213 y en el Experimental 5 respectivamente. Según Rodríguez et al. (2021) valores inferiores al 30 % están dentro del rango de aceptabilidad en el programa y valores superiores se consideran deficientes.

Evaluación de impactos

Las condiciones climáticas como temperatura y precipitación variaran si las emisiones de gases de efecto invernadero continúan aumentando a las tasas actuales (Saynes et al., 2016). El rendimiento de maíz blanco aumentará en el escenario ssp126 (bajas emisiones de CO₂) con promedios de 2,14 % y 4,01 % en los periodos 2041-2060 y 2081-2100 respectivamente. Estos resultados concuerdan con Saka et al. (2013), que mencionan que las proyecciones de maíz aumentarán entre el 5 % y 25 % en la década de los 2050. Mientras que, bajo los escenarios con mayores de emisiones de gases de efecto invernadero (ssp370 y ssp585) se proyecta que existirá una reducción en el rendimiento con máximo de 14,86 % y 20,18 % en los periodos 2041-2060 y 2081-2100 respectivamente. Según Cervantes et al.(2014) indican que a mayor incremento de temperatura combinado con el del CO₂, podría afectar negativamente el desarrollo y crecimiento de la planta debido a la presencia de plagas, enfermedades y malezas provocando bajos rendimientos. Estos resultados coincidieron con Stevens y Madani (2016), en sus proyecciones para la década del 2050 que fueron realizadas en la región productora de Malawi, en el distrito de Lilongwe, mencionando que la producción de maíz presentará cambios en su rendimiento bajo el régimen de CC, en un rango de -1,2 % a 1,0 %. Sin embargo, para la década del 2080 presentará cambios proyectados de un 3,0 % a 0,2 %. De igual manera, Msowaya (2015), determinó que existirán disminuciones notables en el rendimiento de maíz de secano en Malawi de 14 % y el 7 % para el 2050; mientras que, para la década del 2080 existirán reducciones más notorias de 33 % a 13 %. Así también, Zinyengere et al. (2014) menciona que para el 2050 los rendimientos de maíz se reducirán en un 5 % en Lilongwe y en Big Bend un 20 %. Del mismo modo, Cervantes et al. (2014) mencionan que el CC puede inducir para 2050 una reducción del 13 % en el rendimiento neto de maíz en China. Estos resultados podrían deberse a lo mencionado por Noriega et al. (2021) y Lin et al., (2014) quienes indican que la disminución del rendimiento de maíz podría deberse a un incremento de la variable temperatura y disminución de la precipitación, provocando una reducción en su periodo vegetativo, lo cual este afecta a los procesos de polinización causando efectos negativos en la fase de llenado de grano y por ende provocando una reducción en su rendimiento y generando pérdidas económicas.

Todos los escenarios climáticos futuros indicaron una tendencia general hacia duraciones más cortas de fase vegetativa y reproductiva para la variedad INIAP 103 Mishqui Sara, y por lo tanto una reducción del ciclo total del cultivo. Las proyecciones de variación del ciclo fenológico del cultivo de maíz se verán disminuidos bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (ssp126, ssp370 y ssp585) con un máximo de 25 %, 35 % y 38 %,

en sus periodos evaluados (2042-2060 y 2081-2100) respectivamente. Esto podría deberse a lo mencionado por Fahad et al. (2017), en la cual indica que a medida que aumenten las temperaturas y los déficits de precipitaciones, este cultivo presentaría estrés por sequía durante la etapa de crecimiento, reproducción y en la fisiología de la planta, misma que tiene el efecto más devastador en el rendimiento. Por otro lado, Khalili et al.(2021), también mencionan que a bajas precipitaciones el maíz presentará un estrés hídrico por sequía debido a la falta de humedad, que afectará la fase de emergencia, el crecimiento vegetativo temprano, el desarrollo de las raíces, la capacidad fotosintética, el crecimiento reproductivo como la floración, la formación de semillas y rendimiento. Además, el estrés hídrico durante la floración causa un mayor efecto negativo en las flores femeninas (sedas) generando una reducción significativamente de la formación y llenado de granos. Por otro lado, el incremento de la variable temperatura en su crecimiento y desarrollo provoca efectos negativos en el proceso de polinización (Kumar et al., 2011; Ojeda et al.2011), incremento de la respiración, disminución de la fotosíntesis (Ramos et al.,2009; Ojeda et al., 2011), reducción de las etapas vegetativas y reproductivas, generado una disminución del ciclo total del maíz (Ramos et al., 2009; Yuan et al., 2010; Kumar et al., 2011; Ojeda et al., 2011; Zarazúa, 2011).

Es por ello, que se podría contrarrestar los efectos negativos del cambio climático mediante estrategias de mitigación y prácticas agrícolas como: labores culturales, usos de variedades mejoradas, conservación de humedad del suelo, agroforestería, asociación de cultivos, agricultura de subsistencia etc., que reducen los gases de efecto invernadero en la atmosfera que se dan por el aumento de dos variables climáticas: temperatura y precipitación, con la finalidad de mejorar la productividad agrícola y por ende, su rendimiento (Noriega et al., 2021).

8. Conclusiones.

- La validación del modelo DSSAT CERES-Maize permitió predecir de manera excelente la fase vegetativa, fase reproductiva y rendimiento del maíz INIAP 103 (Mishqui Sara) bajo las condiciones climáticas de Loja, con un error cuadrático medio (RMSEP) menor al 10 %, obteniendo un valor de 0,85 %, 5,97 % y 8,96 %, en la fase vegetativa, reproductiva y rendimiento respectivamente.
- Las proyecciones de variación del rendimiento bajo los diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero indicaron que con altas emisiones de CO₂ (ssp370 y ssp585) existirá una disminución notable en su rendimiento para los dos periodos evaluados. En periodo 2040-2060, el rendimiento de maíz blanco podría disminuir hasta un 14,86 % bajo es escenario ssp 370 y hasta un 17,65 % en el escenario ssp 585. De igual manera, para el periodo 2080-2100 se prevé una disminución de 2,84 % y 20,18 % con medias y altas emisiones de CO₂ respectivamente.
- Las proyecciones de variación del ciclo fenológico indican que existirá una disminución del ciclo total del cultivo. Se determinó que en el escenario ssp126 existirá una reducción no muy notoria en sus dos periodos evaluados con un promedio máximo de 25 %. Mientras que, en los escenarios ssp370 y ssp585, la disminución de su ciclo es de 28 % y 30 % en el periodo 2041-2060 y más acentuada con un 35,6 % y de 38,8 % en periodo 2081-2100.

9. Recomendaciones.

- Validar el modelo de simulación de cultivo DSSAT CERES-Maize bajo distintas condiciones ambientales y edáficas.
- Utilizar datos climáticos futuros de alta resolución para mejorar el entendimiento de los efectos del cambio climático sobre el crecimiento y producción de cultivos.

10. Bibliografía.

- Amiri, E., Irmak, S., & Araji, H. (2022). Assessment of CERES-Maize model in simulating maize growth, yield and soil water content under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 259, 107271. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107271>
- Basantes, E. (2015). *MANEJO DE CULTIVOS ANDINOS DEL ECUADOR*. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10163/4/Manejo%20Cultivos%20Ecuador.pdf>
- Boada, R., & Espinosa, J. (2016). Factores que Limitan el Potencial de Rendimiento del Maíz de Polinización Abierta en Campos de Pequeños Productores de la Sierra de Ecuador. *Siembra*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.29166/siembra.v3i1.262>
- Caiza, B. (2019). *Caracterización Patogénica, Bioquímica y Molecular del Agente Causal de la Pudrición de Tallo del Maíz, Variedad INIAP-103 Mishqui Sara* [Ingeniera Agrónoma, Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18996>
- Castro, I., & Hétiér, J. (2015). *Modelización y Experimentación en Agronomía*. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-12/010065642.pdf#page=823
- Cervantes, R., Velázquez, G., Tavizón, E., & González, J. (2014). Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 61, Article 61. <https://doi.org/10.33064/iycuaa.2014613655>
- Chávez. (2021, octubre 20). *CLIMATOLOGY IN CMIP5/CMIP6 MODELS - Laboratorio Ambiental Chavezolutions*. <https://chavezolutions.com/noticias-ambientales/climatology-in-cmip5-cmip6-models/>
- Ciampitti, I., Elmore, R., & Lauer, J. (2016). Crecimiento y Desarrollo del Maíz. Informe Especial, 48. Egüez, J., & Pintado, P. (2013). *INIAP-103 Mishqui Sara*. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2342/1/FT3.pdf>
- Egüez, J., & Pintado, P. (2013). *INIAP-103 Mishqui Sara*. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2342/1/FT3.pdf>
- ESPAC. (2022). *Tabulados de la Encuesta de Superficie y producción Agropecuaria Continua*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>

- Fahad S., Bajwa AA, Nazir U., Anjum SA, Farooq A., Zohaib A., Sadia S., Nasim W., Adkins S., Saud S. Producción de cultivos bajo estrés por sequía y calor: respuestas de las plantas y opciones de manejo. *Portada. Plant Sci.* 2017; 8 :1147. doi: 10.3389/fpls.2017.01147.
- Fernández, M. (2013). *Diagnóstico de Modelos Agroclimáticos*. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Uso+de+Modelos+agroclim%C3%A1ticos.pdf/9f53a23d-9afa-4fda-aad3-5fe407c6cfea>*Journal of Agronomy*, 18(3), 235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Figarola, Ghera, Castro, & Ferraro. (2020). *Automatización del Modelo de Simulación de Cultivos DSSAT para Evaluar el Desempeño Productivo Bajo Distintas Estrategias de Manejo y Escenarios Ambientales*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/115512>
- Hernández, N., Soto, C., & Caballero, C. (2009). Modelos de Simulación de Cultivos: Características y Usos. *Cultivos Tropicales*, 30(1), 00-00.
- Iglesias, S., Alegre, J., Salas, C., & Egüez, J. (2018). El rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) mejora con el uso del biochar de eucalipto. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 25-32. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.03>
- INIAP. (2021). *Guía para la Producción Sustentable de Maíz en la Sierra Ecuatoriana*. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5796/1/GUIA%20CULTIVO%20DE%20MAIZ%202021-1.pdf>
- IPCC. (2023). *Archivo de Datos del Experimento del Modelo Climático Global*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://ipcc-data.org/sim/gcm_monthly/
- Jones, J., Hoogenboom, G., Porter, C., Boote, K., Batchelor, W., Hunt, L., Wilkens, P., Singh, U., Gijsman, A., & Ritchie, J. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Khalili M., Naghavi MR, Aboughadareh AP, Rad HN Efectos del estrés por sequía en el rendimiento y los componentes del rendimiento en cultivares de maíz (*Zea mays* L.) *Int. J. Agron. Plant Prod.* 2013; 4 :809–812.
- Kumar, S., Aggarwal, P., Rani, S., Jain, S., Saxena, R., y Chauhan, N. Impact of climate change on crop productivity in Western Ghats, Coastal and Northeastern Regions of India. *Current Science*, 101(3): 332-341, 2011.
- Lin, Y., Wu, W., & Ge, Q. (2014). CERES-Maize model-based simulation of climate change impacts on maize yields and potential adaptive measures in Heilongjiang Province,

- China. *Journal of the science of food and agriculture*, 95.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.7024>
- Ludeña, C., & Wilk, D. (2013). *ECUADOR: Mitigación y Adaptación al Cambio Climático*.
 studylib.es. <https://studylib.es/doc/8681484/ecuador--mitigación-y-adaptación-al-cambio-climático>
- Msowoya, K. Impactos del cambio climático en la producción de maíz de secano en Malawi.
 (2013). Disponible en: http://etd.fcla.edu/CF/CFE0005036/Thesis_Paper_for_Kondwani_Msowoya_Final.pdf.
- Noriega, J. L., Salazar, & López. (2021). Revisión: Modelos de crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(1), 127-140. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2552>
- Ojeda, W., Sifuentes, E., Íñiguez, M., y Montero, M. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45(1): 1-11, 2011.
- Ovando, G., Sayago, S., Salvagiotti, F., & Bocco, M. (2017). *Estimación del rendimiento de soja con datos de radiación solar de CERES*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/62827>
- Paliwal, R. (2011). *EL MAÍZ EN LOS TRÓPICOS: Mejoramiento y Producción*.
<https://www.fao.org/3/x7650s/x7650s00.htm>
- Rodríguez, O., Florido, R., Hernández, N., Soto, F., Jeréz Mompié, E., González, D., & Vázquez, R. (2021). Simulación de estrategias de manejo a partir del modelo DSSAT para incrementar los rendimientos de un cultivar de maíz. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?Script=sci_abstract&pid=S207934802021000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Saka, JDK, Sibale, P., Thomas, TS, Hachigonta, S. y Sibanda, LM Malawi en *la agricultura del sur de África y el cambio climático: un análisis exhaustivo* (eds Hachigonta, S., Nelson, GC, Thomas, TS y Sibanda, LM) 111 – 146 (Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias, 2013).
- Saynes, V., Etchevers, J., Paz, F., & Alvarado, L. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 83-96.
- Valdez, F. (2022). *“Producción de Híbridos de Maíz (Zea mays L.) con Varios Distanciamientos de Siembra, Cantón El Triunfo, Provincia del Guayas* [Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/63821/1/TESIS%20FINAL%20FRANKLIN%20VALDEZ.pdf>

- Yuan, L., Enli, W., Xiaoguang, Y., y Jing, W. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s. *Global Change Biology*, 16(8): 2287-2299, 2010
- Zarazúa, P., Ruiz, J., González, D., Flores, H., y Ron, J. Impactos del cambio climático sobre la agroclimatología del maíz en la Ciénega de Chapala, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Esp. Núm. 2*, 351-363, 2011
- Zinyengere, N., Crespo, O., Hachigonta, S. y Tadross, M. Impactos locales del cambio climático y las prácticas agronómicas en cultivos de secano en el sur de África. *Agric. Ecosyst. Environ.* 197, 1–10 (2014).

11. Anexos.

Anexo 1. Construcción de la calicata



Anexo 2. Medición de horizontes



Anexo 3. Toma de muestras



Anexo 4. Muestras saturadas



Anexo 5. Tamizado de muestras



Anexo 6. Registro de datos



Anexo 7. Modificación de coeficientes genéticos

Textpad - [C:\DSSAT48\Genotype\MZCER048.CUL]

Archivo Editar Buscar Ver Herramientas Macros Configuración Ventana Ayuda

Selector de Documentos: MZCER048.CUL

```

! ECUADOR Loja Argelia
!LJ0001 INIAP103 . IB0001 275.0 0.000 935.0 559.0 7.20 63.00
!LJ0001 INIAP103 . IB0001 275.0 0.000 935.0 470.0 5.00 63.00
!J0001 INIAP103 . IB0001 280.0 0.000 935.0 600.0 4.90 58.00
!LJ0001 INIAP103 . IB0001 300.0 0.000 820.0 600.0 6.00 75.00
!LJ0001 INIAP103 . IB0001 300.0 0.000 820.0 550.0 6.30 75.00
!LJ0001 INIAP103 . IB0001 300.0 0.000 820.0 700.0 5.30 75.00
LJ0002 INIAP103 . IB0001 255.0 0.000 820.0 420.0 9.00 68.30
    
```

Anexo 8. Base de datos de clima

Textpad - [C:\Users\Usuario\Documents\DSSAT_TESIS\DATOS CLIMATICOS\ESCENARIO_126_2050_1.txt]

Archivo Editar Buscar Ver Herramientas Macros Configuración Ventana Ayuda

Selector de Documentos: ESCENARIO_126_2050_1.txt

DATE	SRAD	TMAX	TMIN	RAIN
41001	18.9	28.1	9.6	0.0
41002	18.4	27.6	9.8	0.0
41003	18.6	26.8	9.3	0.1
41004	17.8	27.0	9.8	0.3
41005	17.0	26.6	9.8	0.2
41006	14.4	25.5	10.1	6.9
41007	16.7	25.7	10.2	2.3
41008	17.1	26.3	10.2	0.1
41009	17.9	27.6	10.7	0.3
41010	16.3	25.9	10.7	2.5
41011	18.4	27.0	11.5	0.0
41012	17.4	26.3	10.7	3.6
41013	16.5	25.6	10.6	9.0
41014	16.3	24.5	9.8	5.8
41015	15.3	25.6	11.2	8.4
41016	11.6	25.9	12.0	6.0
41017	16.3	27.8	12.2	7.9
41018	16.2	27.8	12.4	9.9
41019	15.3	27.2	12.9	12.6
41020	13.1	26.3	11.8	15.5
41021	9.9	24.4	11.1	29.0
41022	13.9	25.3	11.0	14.0
41023	17.5	28.4	12.5	2.4
41024	14.4	27.2	12.0	3.6
41025	16.0	27.5	12.1	14.1
41026	11.3	24.8	10.5	37.4
41027	18.9	27.2	12.0	4.5
41028	20.0	27.8	11.4	1.8
41029	19.0	27.2	12.1	0.9
41030	15.8	28.1	12.8	6.1
41031	15.0	26.7	11.9	11.0
41032	13.8	24.8	9.9	7.4
41033	16.8	25.0	10.8	8.0

Muestra el resultado de último comando Buscar en archivo

Anexo 9. Resultado de las simulaciones en el programa DSSAT CERES-Maize

Textpad - [C:\Users\Usuario\Documents\DSSAT_TESIS\DATOS CLIMATICOS\RESULTADO_126_2050\GFDL_126.txt]

Archivo Editar Buscar Ver Herramientas Macros Configuración Ventana Ayuda

Selector de Documentos: GFDL_126.txt

2024; 21:33:41

.. DATES										DRY WEIGHT, YIELD AND YIELD COMPONENTS.....										FRESH WEIGHT.....					
EV	SDAT	PDAT	EDAT	ADAT	MDAT	HDAT	HYEAR	DWAP	CWAM	HMAM	HMAH	BMAH	PWAM	HMUM	HMAM	HMUM	HMAM	HMUM	LAIX	FCWAM	FCWUM	HMAMF	FBWAM	FCWAM	
60	1941333	1941333	1941339	1942055	1942128	1942128	1942	-99	11567	5373	5373	0	7493	0.4902	1096	174.0	0.465	1.9	-99	-99	-99	-99	-99	-99	
60	1942129	1942333	1942339	1943056	1943131	1943131	1943	-99	13341	5821	5821	0	8470	0.4945	1177	186.8	0.436	2.4	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1943132	1943333	1943340	1944061	1944141	1944141	1944	-99	13102	6166	6166	0	9481	0.5211	1183	187.8	0.471	2.0	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1944142	1944333	1944339	1945058	1945135	1945135	1945	-99	12696	5901	5901	0	7869	0.4894	1206	191.4	0.465	2.1	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1945136	1945333	1945339	1946053	1946123	1946123	1946	-99	12191	5593	5593	0	7430	0.4680	1195	189.7	0.459	2.0	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1946124	1946333	1946340	1947057	1947132	1947132	1947	-99	12017	5616	5616	0	6905	0.4929	1139	180.9	0.467	1.9	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1947133	1947333	1947339	1948058	1948136	1948136	1948	-99	12827	6306	6306	0	9372	0.5124	1231	195.3	0.492	1.6	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1948129	1948333	1948339	1949056	1949128	1949128	1949	-99	14018	6152	6152	0	9717	0.4680	1314	208.6	0.439	2.3	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1949129	1949333	1949339	1950059	1950135	1950135	1950	-99	13156	6114	6114	0	8593	0.5039	1213	192.6	0.465	2.0	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1950136	1950333	1950340	1951058	1951131	1951131	1951	-99	13358	6269	6269	0	9141	0.4770	1314	208.6	0.469	2.0	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1951132	1951333	1951340	1952056	1952130	1952130	1952	-99	11724	4903	4903	0	6542	0.4411	1111	176.4	0.418	2.2	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1952131	1952333	1952340	1953060	1953137	1953137	1953	-99	12280	6181	6181	0	8075	0.5220	1184	188.0	0.503	1.8	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1953138	1953333	1953340	1954062	1954137	1954137	1954	-99	9659	4725	4725	0	6719	0.4528	1044	165.6	0.489	1.5	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1954138	1954333	1954339	1955057	1955127	1955127	1955	-99	8712	3561	3561	0	4862	0.4614	772	122.5	0.409	2.0	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1955128	1955333	1955339	1956058	1956134	1956134	1956	-99	13985	6333	6333	0	9655	0.5040	1257	199.4	0.453	2.2	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1956135	1956333	1956339	1957053	1957125	1957125	1957	-99	11384	5311	5311	0	7844	0.4860	1093	173.5	0.467	1.8	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1957126	1957333	1957339	1958059	1958136	1958136	1958	-99	10382	5271	5271	0	6213	0.5220	1010	160.3	0.508	1.7	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1958137	1958333	1958340	1959063	1959139	1959139	1959	-99	9453	4753	4753	0	5654	0.5020	947	150.3	0.503	1.4	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
60	1959140	1959333	1959339	1960058	1960131	1960131	1960	-99	12297	5891	5891	0	7854	0.4950	1190	188.9	0.479	1.9	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99

Anexo 10. Certificado del resumen

Lic. Andrea Sthefanía Carrión Mgs

0984079037

andrea.s.carrion@uni.edu.ec

Loja-Ecuador

Loja, 17 de julio del 2024

La suscrita, Andrea Sthefanía Carrión Fernández, Mgs, **DOCENTE EDUCACIÓN SUPERIOR** (registro de la SENESCYT número: 1008-12-1124463), **ÁREA DE INGLÉS-UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**, a petición de la parte interesada y en forma legal.

CERTIFICA:

Que la traducción del resumen del documento adjunto, solicitado por la señorita: **María Fernanda Zapata Cartuche** con cédula de ciudadanía **No. 1150429569**, cuyo tema de investigación se titula: **"Validación del modelo de cultivo DSSAT CERES-Maize para simular rendimientos de maíz blanco bajo condiciones de cambio climático futuro en el sector la Argelia, Loja"** ha sido realizado y aprobado por mi persona, Andrea Sthefanía Carrión Fernández, Mgs. en Pedagogía.

El apartado del Abstract es una traducción textual del Resumen aprobado en español.

Particular que comunico en honor a la verdad para los fines académicos pertinentes, facultando al portador del presente documento, hacer el uso legal pertinente.

ANDREA STHEFANIA
CARRION
FERNANDEZ

Firmado digitalmente
por ANDREA STHEFANIA
CARRION FERNANDEZ
Fecha: 2024.07.17
16:22:56 -06'00'

Andrea Sthefanía Carrión Fernández. Mgs.

English Professor