



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
FACULTAD DE AGRONOMÍA E INGENIERÍA FORESTAL
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
MAGÍSTER EN RECURSOS NATURALES

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL CULTIVO DE
MAÍZ EN CHILE

Tesis presentada como requisito para optar al grado de

Magister en Recursos Naturales

por:

Waldo Dávila Peralta

Comité de Tesis
Profesor Guía: Francisco J. Meza
Profesores Informantes:
Andrés Schwember
Horacio Gilabert

Julio 2017
Santiago-Chile

Agradecimientos

Mis agradecimientos a PRONABEC dependencia del Ministerio de Educación que mediante el programa Beca Presidente de la República instaurado por el expresidente Ollanta Humala Taso determinó por resolución N° 64-2015-MINEDU-VMGI-PRONABEC-OBSPOST mi incorporación al programa de estudio de Magister en Recursos Naturales en esta casa de estudio.

Al profesor Francisco Meza Dabancens por su paciencia, ayuda y muy valiosa dirección en la realización de la tesis. También como a Fidel Maureira por su paciencia y predisposición en su enseñanza para llevar a cabo este trabajo.

Al Centro de Cambio Global y a ClimaLab por aportar las instalaciones para la culminación de mi tesis. Asimismo, al Ing. Agrónomo Ricardo Behn, de la empresa ANASAC, por facilitarnos la información inicial para el desarrollo de la tesis. Además, al Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI siglas en inglés), por ser parte del financiamiento en el periodo de término de la tesis.

A Daly Peralta Ortiz y a Waldemar Dávila Melgarejo, mis padres, por su apoyo incondicional, sus llamadas, su preocupación y su alegría compartida por llegar a este momento.

A Joel, Milka y Naomí Dávila Peralta, por ser parte de mi motivación para mejorar cada día por los momentos felices e invaluables compartidos con ellos. Como a Carla Coronado Flores, por conocerte, por compartir tus caminos, sonrisas y planes a futuro.

A Stephanie Orellana, Melanie Oertel, Shaw Lacy, David Morales, Nicolás Bambach, Diego Ocampo, por su ayuda y consejos durante este arduo trabajo. Y a todas las personas involucradas de alguna u otra manera en esta investigación.

Dedicatoria

*En primer lugar a **Dios**
A mis padres Daly y Waldemar
A mis hermanos Joel, Milka y Naomi
A mi enamorada Carla*

INDICE

Contenido

Abstract.....	3
1. Introducción.....	4
2. Materiales y métodos	6
2.1. Descripción de la base de datos	6
2.2. Datos de clima	7
2.3. Estimación de la fecha de madurez fisiológica.....	7
2.4. Parámetros del cultivo	8
2.5. Información de suelo.....	10
2.6. Datos del manejo del cultivo	10
2.7. Estimación del índice de área foliar (IAF) por sensores remotos....	11
2.8. Valores simulados y análisis estadístico para la calibración y validación de los modelos	12
2.9. Simulación del desarrollo del cultivo de maíz bajo escenarios de cambio climático.....	12
2.9.1. Generación de clima para los escenarios RCP 2,6 y RCP 8,5	12
2.9.2. Información de suelos	15
2.9.3. Variedades y manejo del cultivo simulados	15
2.9.4. Variables simuladas evaluadas	16
3. Resultados	18
3.1. Calibración, validación del modelo y comparación con datos bibliográficos	18
3.2. Comparación de la serie climática simulada con datos reales	23
3.3. Comparación de los escenarios climáticos RCP 2,6 y RCP 8,5 con el presente en el periodo tradicional del cultivo de maíz.....	26

3.4. El cultivo de maíz bajo escenarios de cambio climático	27
3.4.1. Probabilidad éxito para el establecimiento del cultivo de maíz	27
3.4.2. Efecto del cambio en la producción y calidad del cultivo de maíz	30
3.4.3. Riesgo de sub-producción del cultivo de maíz y cambio en la calidad a nivel local.....	39
3.4.4. Riesgo de temperaturas perjudiciales y estimación de montos de agua en estados críticos de desarrollo del maíz	48
4. Discusiones.....	51
5. Conclusiones.....	57
6. Referencias bibliográficas	59
7. Anexos	66
7.1. Estimación de los GDD	66
7.2. Variables ecofisiológicas del cultivo de maíz llevadas usados como datos de entrada del modelo	67
7.3. Ecuaciones usadas para calcular la reflectancia a partir de imágenes satelitales LAndSat7	68
7.4. Indicadores estadísticos usados en la investigación	70
7.5. Modelos de regresión usados para construir el generador climático	71

Análisis de los efectos del cambio climático sobre el cultivo de maíz en Chile

Waldo Dávila Peralta

Pontificia Universidad Católica de Chile

Abstract

Waldo Dávila Peralta. Analysis of the effects of Climate Change on maize in Chile.

Thesis, *Master of Science* in Natural Resources (Recursos Naturales), Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 78pp. Maize is the second most important crop in Chile. Literature shows that climate change will likely impact crop yields and grain quality in most of the crops. This study analyzes the vulnerability of maize using a calibrated crop model within CropSyst. The model was built using limited field data, publically available weather and soil information, and Landsat 7 datasets in order to estimate Leaf Area Index (LAI). The model was run simulating four sowing dates, under three emission scenarios (Present, RCP 2.6, RCP 8.5) and three time periods in the future (2030, 2050 y 2070). Changes in crop yields were evaluated through a sensitivity analysis, and the effects on grain quality was evaluated by looking at cumulative frequency distribution analysis. Moreover, we assessed other environmental aspects such as vulnerability to high temperature. October 5th was selected as the most representative sowing date for maize production, because it allowed to obtain a balance between yield and grain quality. Additionally, we showed changes in the establishment of the crop as early growing varieties were able to successfully complete their development at southern latitudes. The probabilities of obtaining yields that generate net profits greater than zero were highest with a late variety even in the most severe scenarios (RCP 8.5 in 2050 and 2070).

Key words: Climate change, maize, CropSyst, LandSat7, crop yield, grain quality.

1. Introducción

Es ampliamente aceptado que el incremento en las concentraciones de CO₂ generará un aumento de la temperatura del planeta y afectará el régimen de precipitaciones (Abraha and Savage, 2006; ODEPA, 2013).

Estudios nacionales recientes indican que, frente a distintos escenarios de cambio climático (RCP 2,6 y RCP 8,5), las temperaturas incrementarán entre 0,0 a 2,5°C en promedio para el periodo entre el 2030 al 2050. Además, el régimen de precipitaciones se reducirá en la zona central y parte de la zona sur en montos que oscilan entre el 20 a 30%. En cambio, en la parte norte del país se espera que ellas aumenten, estimándose en 30 a 40% de incremento (Universidad de Chile, 2012).

Como consecuencia del cambio climático se producirían efectos desfavorables en la agricultura, especialmente en el rendimiento de cultivos de zonas tropicales y subtropicales y lo contrario se observaría en medianas y altas latitudes (IPCC, 2007 citado por FAO, 2013). Asimismo, se espera una tendencia a la reducción del contenido de nitrógeno (N) y proteína en la biomasa de la planta, producto del incremento del CO₂, lo cual afectaría la calidad del producto cosechado (Myers *et al.*, 2014). Por otra parte, existe la expectativa que asociado al incremento de la temperatura se observe un aumento de la concentración de N y proteínas (Abebe *et al.*, 2016) que podría contrapesar el efecto anterior.

El maíz es un cultivo de gran importancia para Chile, siendo el segundo en cuanto al área de siembra (ODEPA, 2017a). Dada su importancia relativa en el país, se hace necesario desarrollar estudios que indiquen cuáles serán los efectos más probables del cambio climático sobre atributos productivos de este cultivo.

Estudios preliminares indican que el cambio climático probablemente afectará los rendimientos promedio del cultivo de maíz (Meza *et al.*, 2008; Santibáñez *et al.*, 2008). Sin embargo, aún falta por generar información sobre la real vulnerabilidad del cultivo, entendida como el cambio en el perfil de riesgo, y en profundizar sobre atributos de calidad del grano que podrían verse afectados por el cambio climático.

Puesto que la experimentación directa requiere de ambientes modificados, de importantes recursos monetarios y de tiempo, los investigadores recurren a modelos de simulación para poder anticipar la respuesta de los cultivos anuales frente a modificaciones ambientales. Estos modelos son versátiles, pero deben estar debidamente calibrados, esto es los parámetros que definen el comportamiento de una variedad deben ser ajustado en función de observaciones reales.

Desafortunadamente, el costo de calibrar modelos para un cultivo con potenciales usos para predecir los efectos del cambio climático, puede ser alto. Esto debido a que los modelos usan variables que son obtenidas mediante mediciones de variables ecofisiológicas en terreno, muchas veces empleando equipos sofisticados.

CropSyst es un modelo ampliamente usado en el estudio de la dinámica de cultivos anuales (entre ellos el maíz) y en la proyección de los efectos de cambio climático (Bouazzama *et al.*, 2013; Ceglar, Chukaliev, *et al.*, 2013; Díaz-Ambrona, Gigena and Mendoza, 2013; Tingem, *et al.*, 2008). Debido a su alto desempeño y capacidad de simular distintas condiciones de manejo y ambientales (entre ellas el enriquecimiento de CO₂) es que se ha transformado en una herramienta aceptada para este tipo de estudios en la comunidad científica internacional.

Cropsyst necesita de información proveniente de terreno como datos de entrada, información que es difícil de obtener. De ahí que sea de especial relevancia el poder desarrollar metodologías que permitan maximizar el uso de información disponible gratuitamente y que ha sido publicada en distintas fuentes, tales como internet, publicaciones científicas, reportes oficiales de instituciones nacionales o alguna otra fuente fiable para la calibración del modelo.

Hoy en día las imágenes de satélite, por ejemplo LandSat7, entregan información de terreno útil con suficiente frecuencia y cobertura espacial como para ser consideradas como fuente de datos de calibración de modelos. Por lo tanto, este proyecto se construye sobre la premisa que la información de satélite permite contar con información complementaria, representativa y valiosa para la calibración de modelos, permitiendo

realizar estudios a gran escala (como por ejemplo a lo largo de Chile), reduciendo los costos de investigación en forma significativa.

El objetivo de este trabajo es calibrar un modelo de simulación del cultivo de maíz, empleando CropSyst, que sea lo suficientemente representativo para todo Chile complementado con información disponible en la bibliografía científica como con sensores remotos. El modelo calibrado fue usado para estudiar los efectos del cambio climático sobre el rendimiento y calidad del maíz en diferentes escenarios y periodos de tiempo. Los cambios en los rendimientos fueron evaluados por curvas de frecuencia relativa acumulada de esta variable para determinar su nivel de vulnerabilidad y realizar análisis de sensibilidad, es decir, observar los riesgos de pérdidas económicas. Por último la calidad del maíz fue medida a través del cambio de la concentración del N en la materia seca total de la planta.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción de la base de datos

La base de datos de rendimiento y fechas de siembra corresponde a registros de parcelas experimentales (PE) de las temporadas del cultivo de maíz 2011/2012, 2012/2013 y 2013-2014, provistos por la empresa ANASAC. La temporada 2011/2012 fue usada para la calibración de los modelos, mientras que las dos subsiguientes temporadas fueron usadas para la validación de los modelos. Los datos registrados corresponden a diversas localidades de Chile ubicadas entre las latitudes 32,76° S y 37,47° S, lo que abarca localidades comprendidas entre la región de Valparaíso y del BíoBío. El material vegetal sembrado corresponde a tres variedades de maíz, las cuales han sido referidas acá con los números 5; 6 y 7 para mantener independencia de los atributos comerciales de las variedades. Las densidades de cultivo variaron entre 6,90 y 11,40 plantas m⁻² en todas las parcelas experimentales. Los datos registrados por cada área experimental correspondieron a variedad, región, localidad, densidad del cultivo (plantas m⁻²), superficie (ha), rendimiento (kg ha⁻¹), fecha de siembra, fecha de cosecha y humedad del grano de maíz al momento de la cosecha. Por último, se registró una sola coordenada para todas las áreas experimentales reunidas en un predio agrícola.

2.2. Datos de clima

Las variables climáticas consideradas de forma diaria correspondieron a precipitación acumulada (mm), temperatura máxima y mínima (°C), radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), humedad relativa máxima y mínima (%) y velocidad de viento (m s^{-1}). Los datos de clima fueron obtenidos desde las estaciones meteorológicas más próximas a cada ensayo pertenecientes a la red de la Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) y de la red Meteorológica de Vinos de Chile (MeteoVID). Se seleccionaron aquellas estaciones que contaban con el mayor número de registros de estas variables para las temporadas de cultivo. En los registros con datos faltantes se procedió a aplicar técnicas estadísticas de relleno de datos (DGA, 2016), mediante correlaciones de la variable a rellenar con la misma variable de otra estación que poseía datos disponibles del periodo de tiempo a rellenar. El criterio de selección correspondió al de máxima correlación, con un límite mínimo de 0,50. Los datos, que no pudieron ser rellenos mediante la metodología anterior, fueron rellenos mediante autocorrelaciones con un día anterior (persistencia de la variable con la observada el día anterior) y como última opción empleando la media aritmética obtenida para la variable en ese mes en otros años.

2.3. Estimación de la fecha de madurez fisiológica

La base de datos de cultivos no disponía de registros para la fecha de ocurrencia del estado de madurez fisiológica. Para determinarla, se asumió que el grano de maíz pierde un porcentaje de humedad diaria ($\%H_p$) en función a la temperatura promedio del ambiente (T), según el modelo de Nielsen (2013):

$$\%H_p = 0,0202 (1,8 T + 32) - 0,7133$$

Puesto que el grano de maíz en madurez fisiológica posee un porcentaje de humedad promedio cercano al 37% (Faiguenbaum, 2003), se calculó la fecha de madurez fisiológica como:

$$\%H_t = (37\% - H_c)$$

Donde: H_c es el porcentaje de la humedad del grano en el tiempo de la cosecha, y $\%H_t$ es la humedad total perdida entre tiempo transcurrido (en días) entre la madurez fisiológica y la cosecha. El día donde la sumatoria de los valores de $\%H_p$ (desde la cosecha hacia la siembra) igualó $\%H_t$ fue D_t . Por último, la fecha de madurez fisiológica (FMF) es estimada como, $FMF = Fcos - D_t$. Donde, $Fcos$ es la fecha de cosecha que fue registrada por ANASAC.

2.4. Parámetros del cultivo

Para la estimación de los grados días acumulados (GDA) se verificó que las áreas experimentales reunidas en un predio agrícola se encontraran cercanas a una estación meteorológica (con datos disponibles) a una distancia menor o igual a 6 km.

Posteriormente, se tomó en cuenta una temperatura base (T_b) de 5°C y una temperatura máxima de desarrollo (T_{cutoff}) de 30°C, el cálculo para los grados días fue estimado siguiendo el procedimiento descrito en la documentación del modelo CropSyst (Stöckle and Nelson, 1998) que es mostrado en la Tabla 1.

La temperatura base de 5°C fue obtenida mediante calibración, minimizando la diferencia entre el tiempo estimado hacia la madurez fisiológica y el simulado por el modelo en la fase de calibración y validación (Tabla 3). Ella también corresponde al valor más cercano a 8°C (usado ampliamente en la literatura).

Tabla 1. Comparación de Grados Día Acumulados (GDA) desde la siembra hasta la madurez fisiológica.

Variedad	N° de PE (*)	Promedio de GDA	DE(**)
5	6	2055	72,23
6	5	2222	79,60
7	3	2208	93,86

(*) Parcelas experimentales, (**) DE: Desviación estándar

Tabla 2. Tiempo del cultivo simulado y estimado a partir de los datos de terreno desde la siembra hasta la madurez fisiológica.

Fase de la construcción del modelo	Variedad	PE(*)	Promedio del tiempo de desarrollo del cultivo (días)	
			Estimado	Simulado
Calibración				
	5	6	149,00	137,33
	6	5	151,82	148,85
	7	3	148,25	147,25
Validación				
	5	16	152.44	146.69
	6	21	151.71	158.40
	7	14	152.86	157.14

(*) Parcelas experimentales

Para estimar los GDA en las etapas fenológicas intermedias entre la siembra a la madurez se usó la proporción existente entre cada etapa según lo reportado por Díaz-Ambrona *et al.* (2013). Los resultados de esta estimación se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Grados Día Acumulados desde la siembra hasta diferentes etapas fenológicas del cultivo para las diferentes variedades.

Etapa de desarrollo	Variedad		
	5	6	7
Emergencia	144	156	155
Máximo desarrollo de raíz	985	1065	1058
Fin del crecimiento del dosel	985	1065	1058
Inicio de la floración	1106	1196	1188
Llenado del grano	1491	1612	1602
Madurez fisiológica	2055	2222	2208

Los demás parámetros del cultivo fueron obtenidos a partir de la literatura científica disponible o reemplazados por los valores que vienen por defecto en el CropSyst. El detalle de los parámetros para cada variedad puede ser visto en los anexos (anexo 7.2).

2.5. Información de suelo

Los datos de suelo fueron tomados del catastro de suelos del Centro de Información de Recursos Naturales o CIREN (1999, 1997a, 1997b, 1996a, 1996b). Asimismo, se usó el “shapefile” de series de suelo provisto por esta institución para todo Chile. El “shapefile” se interceptó con las coordenadas que reunían áreas experimentales en un predio mediante el programa QGIS v2.8.7. De esta manera se tomó la serie de suelo que estaba por debajo del predio. Se ajustó un modelo de regresión para calcular el porcentaje de materia orgánica (%*MO*) en el suelo a partir del porcentaje de carbono orgánico (%*CO*). El modelo de regresión ($R^2= 0,72$) empleado corresponde a la ecuación $\%MO = 1,33 + 0,36 \times \%CO$.

2.6. Datos del manejo del cultivo

Información sobre la fertilización, riego o condiciones iniciales y laboreo del suelo, fue determinada según prácticas habituales de cultivo. El laboreo del suelo¹ es mostrado en la Tabla 4. Para la estimar la fertilización se calculó el nitrógeno necesario (N_c) para el cultivo según el rendimiento de materia seca (R_{MS}) registrada; y fue calculado como $N_c = 2.4 * R_{MS}$ (Fundación Chile, 2011). El nitrógeno en el suelo (N_s) asumido fue de 20ppm y la fertilización con nitrógeno (N_F) aplicada en la simulación fue $N_F = N_c - N_s$. A su vez N_F fue dividida en 30% aplicada en la siembra y 70% a los 33 días (maíz intermedio en estado de 8 a 10 hojas) (Vidal *et al.*, 2015). El rango del riego fue entre 20 a 40mm y fue realizado cuando el contenido de agua en el suelo alcanzó valores entre 0,35 a 0,60 del agua disponible a capacidad de campo, se asumió una eficiencia de 0,45 (Ferreyra *et al.*, 1995).

¹ Andrés Schwember (2016): Comunicación personal

Tabla 4. Manejo de cultivo de maíz en las áreas experimentales.

Actividad de laboreo en suelo
1 arado de vertedera (16 días antes de la siembra)
1 arado subsolador (50-70cm) (15 días antes de la siembra)
2 rastrajes de discos (15-25cm) (14 días antes de la siembra)
1 labor con vibrocultivador (12 días antes de la siembra)

2.7. Estimación del índice de área foliar (IAF) por sensores remotos

La estimación del índice de área foliar (IAF) se realizó por medio de imágenes satelitales. Se obtuvieron imágenes satelitales LandSat7 correspondientes al path 233 y al row 83-86 donde se podían ubicar todas las áreas experimentales registradas en la base de datos. Las imágenes escogidas fueron aquellas que poseían escasa nubosidad. El período de tiempo de cobertura de imágenes LandSat abarcó del 30 de septiembre del 2011 al 30 de mayo del 2014, coincidentes con la fecha más temprana de siembra y la más tardía de cosecha en todas las áreas experimentales. Las imágenes usadas fueron corregidas mediante el método descrito por Chavez (1988). Posteriormente se procedió a estimar la reflectancia (Singh *et al.*, 2013) para las bandas 3 (ρ_3) y 4 (ρ_4) de LandSat7 y a partir de ella se calculó el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) propuesta por Allen *et al.* (2007) mediante la ecuación:

$$SAVI = (1 + L)(\rho_4 - \rho_3)/(L + \rho_4 + \rho_3)$$

Donde L es una constante que se ajusta según los valores índices de área foliar (IAF) en $m^2 \cdot m^{-2}$ según Cuenca *et al.* (2013). El valor de L de 0,1 produjo valores más cercanos al IAF máximo para maíz ocurrente en la realidad (cercaos al rango de 4 a 6).

Para estimar el valor de IAF se usó la ecuación de Bastiaanssen (1998) para el cultivo maíz, esta ecuación posee un máximo de IAF de 6.

$$IAF = -(\ln(0,69 - SAVI)/0,59)/0,91$$

Para obtener los valores de IAF primero se delimitó el área cubierta por los predios de las áreas experimentales en el tiempo en que se desarrolló el cultivo y se eligieron los píxeles centrales y contiguos hasta completar el área registrada para el predio. El valor de IAF de los píxeles elegidos como parte del área registrada se promedió de forma ponderada según el porcentaje de cobertura de maíz en el píxel para obtener el IAF promedio representando a todas variedades reunidas en un predio. Sin embargo, si los datos no poseían registro de áreas experimentales se estimó solo un valor perteneciente a la coordenada registrada en la base de datos.

2.8. Valores simulados y análisis estadístico para la calibración y validación de los modelos

Las variables simuladas por CropSyst fueron el IAF en $m^2 m^{-2}$, el tiempo de desarrollo y el rendimiento de materia seca (MS) en $kg ha^{-1}$ tanto para la temporada de calibración (2011/2012) y las temporadas de validación (2012/2013, 2013/2014). La comparación de las curvas de IAF estimado por imagen LandSat 7 y IAF simulado por CropSyst fue realizado mediante el coeficiente de eficiencia del modelo (EM) (Anexo 7.4), valores mayores a cero de este estadístico indicaron buenos resultados. Además se utilizó el porcentaje de error absoluto o %PEA (Anexo 7.4).

Por otro lado, la producción simulada y real fue evaluada mediante un modelo de regresión lineal, a través de éste se estimó el sesgo de la simulación, el coeficiente de determinación R^2 y también se usó como indicador la raíz del cuadrado del error medio relativo (RRMSE). Por último, el riego (mm) y absorción de N fue evaluado para observar si los valores simulados fueron razonables y correspondiente con los rendimientos simulados. Las comparaciones fueron realizadas mediante la literatura disponible.

2.9. Simulación del desarrollo del cultivo de maíz bajo escenarios de cambio climático

2.9.1. Generación de clima para los escenarios RCP 2,6 y RCP 8,5

Para realizar simulaciones del comportamiento del cultivo frente a futuros escenarios climáticos se desarrolló un modelo estocástico del tipo Generador Climático (Richardson, C., 1981). Para ello se utilizó la información disponible entre enero del 2011 a junio del

2016 de 44 estaciones de la base de datos de AGROMET-INIA. Para cada estación se calculó de manera mensual los promedios, desviación estándar, correlaciones en el tiempo simultáneo y con desfase de un día para la temperatura máxima (Tx), mínima (Tn), logit de la radiación global sobre la Angot (Logit[Rg/RA]) y logit de la humedad relativa promedio (Logit[HR]). Para la precipitación (PP) se estimaron los parámetros de un modelo markoviano de primer orden de ocurrencia de precipitaciones P01, P00, así como también la suma de precipitación (SumPP), y el promedio y desviación estándar de las intensidades de lluvia de forma mensual. Con dichas variables, se realizaron los modelos de regresión lineal (anexo 7.5-Tabla 11), donde todos los modelos dependían de manera directa o indirecta de la suma de PP y el promedio de Tx y Tn. A partir de esos modelos se pudieron estimar las subsiguientes variables, con los que se realizó una corrección a los valores dados por los escenarios climáticos futuros de “WorldClim” (Hijmans *et al.*, 2005) para las ubicaciones de dichas estaciones. La corrección correspondió a una razón estimada a partir de los valores promedio mensual de SumPP, Tx y Tn del “escenario presente” de WorldClim y los valores observados presentes en sus respectivas estaciones meteorológicas para las mismas variables.

Para recrear la ocurrencia de lluvia en un mes se usó la cadena de Markov de primer grado y los valores de P01 y P00. La intensidad de lluvia fue simulada mediante un modelo exponencial usando el promedio de intensidad de lluvia y la desviación estándar de la intensidad de lluvia. La ocurrencia de lluvia en este trabajo no posee una condicional sobre las variables restantes simuladas; Tx, Tn, logit(Rg/Ra) y logit(HR) debido al poco número de datos para hacer una separación de estas variables en función a días lluviosos y no lluviosos. Asimismo, se usó un modelo autoregresivo multivariado para simular el resto de variables (Tx, Tn, logit[Rg/Ra] y logit[HR]) de forma diaria.

La serie simulada de 50 años que representaba al período presente fue comparada para comprobar los buenos resultados con los datos observados mediante modelos de regresión lineal y el error relativo. Posteriormente, se simuló los escenarios RCP 2,6 y RCP 8,5 escogiéndose los modelos de circulación global (GCM siglas en inglés) en función de cuán rápido aumentará 2°C relativo al año 2000. Se trabajó con uno de los GCM más benignos de los escenarios RCP 2,6; GISS-E2-R, y con el GCM más pesimista del escenario RCP 8,5; GFDL-CM3 (Miao *et al.*, 2014). Para la simulación se usó los

valores corregidos de SumPP, Tx y Tn promedio mensual provisto por WordClim1.4 para la ubicación de las 44 estaciones meteorológicas mencionadas en los años 2050 y 2070 promedio de los periodos 2041-2060 y 2061-2080, respectivamente. Las variables meteorológicas para el año 2030, de ambos escenarios, fueron interpolados mediante modelos lineales generalizados con distribución gamma para la SumPP y modelos lineales o polinomiales de segundo grado para Tx y Tn. Los modelos fueron ajustados a partir de 50 promedios simulados por cada mes para el presente, 2030, 2050 y 2070, generado por el modelo estocástico antes descrito. Asimismo se establecieron las concentraciones de CO₂ para el escenario RCP 2,6 y RCP 8,5 en sus correspondientes años (Tabla 5) en el RCP Database.

Tabla 5. Concentraciones de CO₂ atmosférico en un determinado año y escenario de cambio climático.

Escenario	Año	Concentración de CO₂ (ppm)
RCP 2,6	2030	431
	2050	442
	2070	438
RCP 8,5	2030	449
	2050	541
	2070	677

La velocidad de viento fue estimada como el promedio a nivel diario entre los años disponibles para cada estación meteorológica. Dichas estimaciones de la velocidad de viento fueron usadas para todos los escenarios, presente y futuros (RCP 2,6 y RCP 8,5). Asimismo, la HR promedio, fue descompuesta en HR máxima y mínima diaria mediante las ecuaciones dadas por la Allen *et al.* (1998):

$$HR_{max} = e_a / es_{tmin}$$

$$e_a = 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T_{prom}}{T_{prom} + 237,3}\right) * HR_{prom}$$

$$e_{s_{tmin}} = 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T_{min}}{T_{min} + 237,3}\right)$$

Donde, e_a es la presión real de la temperatura (T_{prom}) y humedad relativa (HR_{prom}) diaria. $e_{s_{tmin}}$ es la presión de saturación de la temperatura mínima y HR_{max} es la humedad relativa máxima. La temperatura mínima fue estimada con la siguiente ecuación $HR_{min} = 2(HR_{prom}) - HR_{max}$. Se estableció un límite mínimo a las estimaciones de HR_{min} de 9%, si este supuesto era violado, entonces se procedía a establecer el valor de HR_{min} de 9% y se recalculaba la HR_{max} .

2.9.2. Información de suelos

La identificación de la serie de suelo se obtuvo por la intersección del “shapefile” de series de suelo del CIREN (CIREN, 2003, 2002, 1999, 1997a, 1997b, 1996a, 1996b) con la ubicación de las 44 estaciones meteorológicas usadas para la construcción de los escenarios presentes y futuros. Si la información acerca de la textura, pH, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono orgánico de la serie de suelo no estuviera disponible, entonces se usó la base de datos en línea de SoilGrids (<https://www.soilgrids.org/>) que dispone a los usuarios una estimación las variables antes mencionadas a nivel mundial.

2.9.3. Variedades y manejo del cultivo simulados

Se consideró para las simulaciones las fechas de siembra del 25 septiembre, 05 de octubre, 15 de octubre y 25 de octubre. Se simuló una tasa de riego que no implicara restricciones hídricas para el cultivo, una lámina entre 20 a 40mm por riego con un umbral del 35% de falta de contenido de agua a 20 cm del suelo. Asimismo, la fertilización fue fijada en función de un rendimiento potencial de 18500 kg ha⁻¹según lo propuesto por Meza y Silva (2009).

Cada combinación de variedad y fecha de siembra fue expuesta a los escenarios presente (representando el 2016); RCP 2,6 y RCP 8,5 para los períodos 2030, 2050 y 2070 (2 escenarios de emisiones * 3 períodos= 6 escenarios futuros). Para cada variedad, fecha de siembra y escenario-año se simularon un total de 30 temporadas en una serie climática de 31 años realizada para cada ubicación de las estaciones meteorológicas.

2.9.4. Variables simuladas evaluadas

Para evaluar el éxito de establecimiento en una determinada zona se fijaron los siguientes criterios al interior de cada simulación. Primero se evaluó que la temperatura del ambiente no fuera ni mayor ni inferior al umbral que puede resistir el cultivo. Segundo que el tiempo de desarrollo desde la siembra a la madurez no excediera el número de días contados desde el tiempo de siembra hasta la fecha del 02 de mayo (límite máximo fijado por juicio de expertos y que corresponde a la fecha más tardía de cosecha dada por ANASAC). El umbral de temperatura mínima fue 0°C y el máximo de 40°C. Posteriormente se estimó una probabilidad de establecimiento (estimada como número de éxitos / número de simulaciones) usando las 30 temporadas. Valores iguales o superiores a 0,90 fueron considerados como situaciones en las cuales el maíz podía establecerse con éxito en un determinado lugar.

Para elegir una fecha óptima de siembra del maíz en Chile y poder compararlo con los resultados que corresponden al tiempo presente, se optó por acotar el área de estudio desde Coquimbo (IV) hasta la Araucanía (IX). Se usaron los promedios de las localidades correspondientes a cada zona de Chile. La fecha óptima de siembra fue determinada como un balance entre éxito de establecimiento y el logro de un equilibrio entre los valores de rendimiento y calidad. Asimismo, se estimó la desviación estándar y el coeficiente de asimetría de los valores de rendimiento y calidad agrupados por zonas.

Posterior a la elección de la fecha óptima de siembra se evaluaron el rendimiento, duración del cultivo, evapotranspiración diaria, riego y calidad de grano. La calidad en el grano fue evaluada como la cantidad de nitrógeno absorbido por la planta dividido por la materia seca total o MST (biomasa seca radicular + biomasa aérea). Esto porque se

conoce que el 65% del N absorbido por la planta, estimado a partir de Subedi y Ma (2005), es traslocado al grano de maíz. Además ha sido reportado en otro cereal como la avena que el nitrógeno absorbido por la planta incide de manera directa en la cantidad de N y proteína del grano (Huggins *et al.*, 2010).

La sensibilidad del rendimiento frente al cambio climático se evaluó mediante frecuencias relativas acumuladas de la misma variable, generadas a partir de las 30 temporadas simuladas, es decir se representó la distribución de los rendimientos por medio de un porcentaje acumulado (frecuencia absoluta acumulada del rendimiento*100 / 30). Asimismo se realizó un análisis de sensibilidad en función al costo de producción y precio del maíz de la temporada 2016-2017 en la región de O'Higgins, solo se usó esta región debido a que era la única información reportada por el ODEPA (2017). El costo de producción (pesos chilenos ha⁻¹) y el precio de venta (pesos chilenos kg⁻¹), 1 861 183 \$ ha⁻¹ y 129 \$ kg⁻¹ (ODEPA, 2017). Si se asume que el maíz posee 15% de humedad en el grano, el rendimiento que permite cubrir los costos directos corresponde a 14427,78 kg ha⁻¹ valor estimado como la división entre el costo de producción y el precio del maíz. Rendimientos por encima del valor de ganancia neta cero provocarían ganancias económicas, sin embargo, rendimientos inferiores pérdidas económicas. También, se evaluó el efecto de la temperatura y las concentraciones de CO₂ en la calidad del cultivo y las variables que pudieron estar relacionadas desde el punto de vista del modelo.

En forma adicional, quisimos conocer la vulnerabilidad ambiental que poseía en cultivo de maíz frente al cambio climático. Esto se evaluó mediante la estimación de la probabilidad de tener temperaturas altas perjudiciales para las etapas de florecencia y llenado del grano que se ha comprobado impactan en la producción del maíz. Las temperaturas consideradas perjudiciales fueron de 37,3°C y 36,0°C para la fase de florecimiento y llenado de grano respectivamente según Sánchez, Rasmussen, & Porter (2014). También se evaluó la probabilidad de tener lluvias en los 20 días posteriores a la madurez fisiológica, evento de la temporada 2015-2016 que produjo problemas en las actividades de cosecha. Por último, el monto de lluvia que contribuye a la demanda de agua del cultivo de maíz para una producción óptima.

3. Resultados

3.1. Calibración, validación del modelo y comparación con datos bibliográficos

El rendimiento simulado por el modelo CropSyst de cada variedad comparada con la producción real puede ser encontrado en la (Figura 1). Los modelos de las variedades 5, 6 y 7 presentan buenos resultados al estimar el rendimiento real. Siendo el de mejor desempeño el modelo de la variedad 7, con un $R^2=0,90$; un sesgo en la ecuación de $1351,46 \text{ kg ha}^{-1}$ y un RRMSE de 8,89%. Sin embargo, el modelo de la variedad 6 posee un mayor número de áreas experimentales a comparar, por lo que se considera como el más robusto de las tres variedades y posee un RRMSE 10,23%. Los valores de R^2 y el sesgo en la ecuación en esta etapa son muy similares a los reportados por Jin & Zhu (2008) que obtuvo un R^2 de 0,80 y un sesgo de $1,19 \text{ t ha}^{-1}$.

En la fase de validación, el modelo de la variedad 6 obtuvo el mejor ajuste con un R^2 de 0,74 y RRMSE de 15,02%. Asimismo, las restantes variedades muestran aceptables resultados en la validación (RRMSE aproximado al 20%). Dichos valores concuerdan con los obtenidos por Stockle *et al.* (1997) objetando la presencia de algunos valores atípicos observados, no muy bien representados en las simulaciones. Por último, según la clasificación de Jamieson, Porter & Wilson (1991) que categoriza modelos en función a su RRMSE, nuestros modelos se ubican en el rango de excelentes (RRMSE<10%) a buenos (10%<RRMSE<20%) para la calibración y de buenos a regulares (20%<RRMSE<30%) para la validación.

Por otro lado, el IAF tuvo buenos valores de EM (mayor a cero) en el 75,00% de las áreas experimentales donde se sembró la variedad 5 y muy bajo en las restantes variedades (< 37,50%) (Tabla 6). El porcentaje de error absoluto (%PEA) también fue menor para la variedad 5 ($1,24 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$; 45,98%) y mayores al 54,98% en las restantes. Las diferencias, entre IAF simulada y estimada por sensores remotos pueden deberse a la forma de estimación del IAF que tuvo un valor de saturación en $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, la estimación puntual del IAF en algunas localidades, los problemas del modelo CropSyst al simular la senescencia del cultivo en algunas localidades, entre otros. No obstante, en la fase de validación, a nivel general el IAF simulado tuvo muy buenos resultados con valores de $EM>0$ en más del 85,00% de las áreas experimentales para todas las variedades.

Asimismo los errores absolutos fueron menores que los observados en la calibración (menor a $1,30 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, 46%). Resultados similares fueron obtenidos por Jégo *et al.* (2010), para variedades de soya y trigo, observándose además que los errores en IAF siempre son mayores que los relacionados a la biomasa o producción.

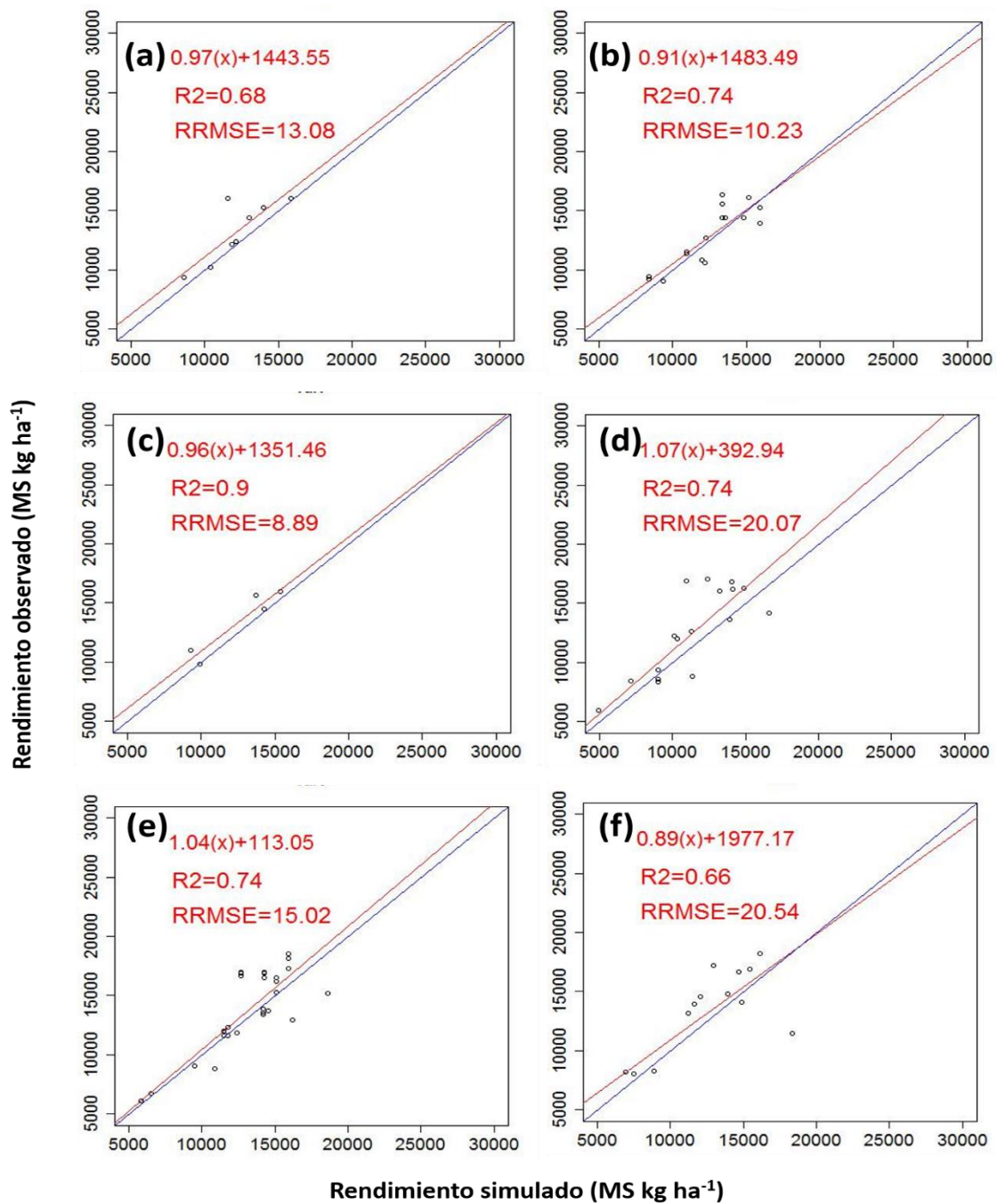


Figura 1. Comparación de los valores simulados y observados del rendimiento de MS (kg ha⁻¹). Calibración: (a) variedad 5, (b) variedad 6 y (c) variedad 7. Validación: (d) variedad 5, (e) variedad 6 y (f) variedad 7.

Por otra parte, la relación entre el monto riego-precipitaciones con el rendimiento simulado se sitúa en los rangos reportados en la literatura (Gurovich and Baerwald, 1980; Rivetti, 2006) tanto para la calibración como la validación (Figura 2-a). Además, se observa rendimientos máximos de 16000 kg ha^{-1} con montos de riego-precipitación de 600 mm para las variedades simuladas. Dicho monto riego-precipitación es similar al evaluado por Rivetti (2006) donde se observa un máximo rendimiento de alrededor de 14000 kg ha^{-1} . Se observó también rendimientos aproximados a 4000 kg ha^{-1} con montos pequeños de riego-precipitación de alrededor de 200 mm tal como lo propone el modelo. Además de corroborarse que montos muy por encima de los 600 mm no producen rendimientos mayores a los 16000 kg ha^{-1} (Gurovich and Baerwald, 1980). Las investigaciones de Meza *et al.* (2008) reportan un cálculo de 450 mm de irrigación para la localidad de Pirque, concordando con lo simulado en el Paine (cercana a Pirque) con una estimación promedio de 500,33 mm. Por último, en la localidad de Chillán, Miranda y Fuentes (1976), observaron riegos de 580 mm para una producción de 15140 kg ha^{-1} , similar a lo simulado en la localidad de Villa Alegre con un monto promedio de 613 mm y producciones cercanas a los 14450 kg ha^{-1} .

Por último la simulación de nitrógeno absorbido por la planta está dentro de rangos observados en la realidad para el cultivo de maíz, según Bender, *et al.* (2013), Ciampitti y Vyn (2013) y Rawal y Kuligod (2014) (Figura 2-b), esto fue observado tanto para la calibración como la validación del modelo.

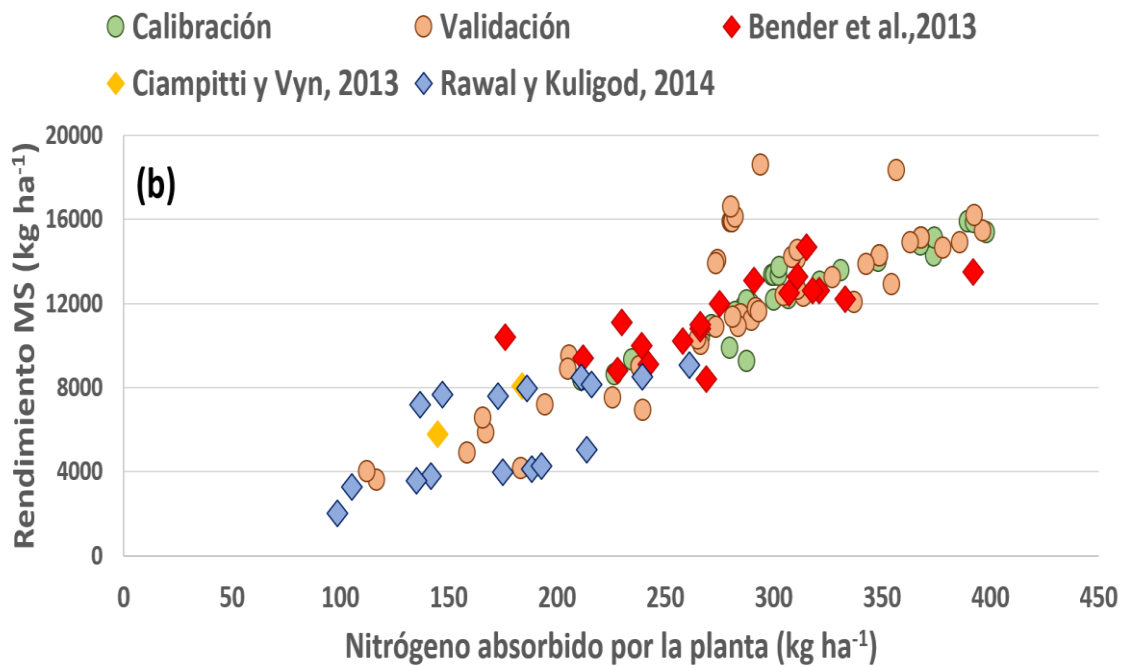
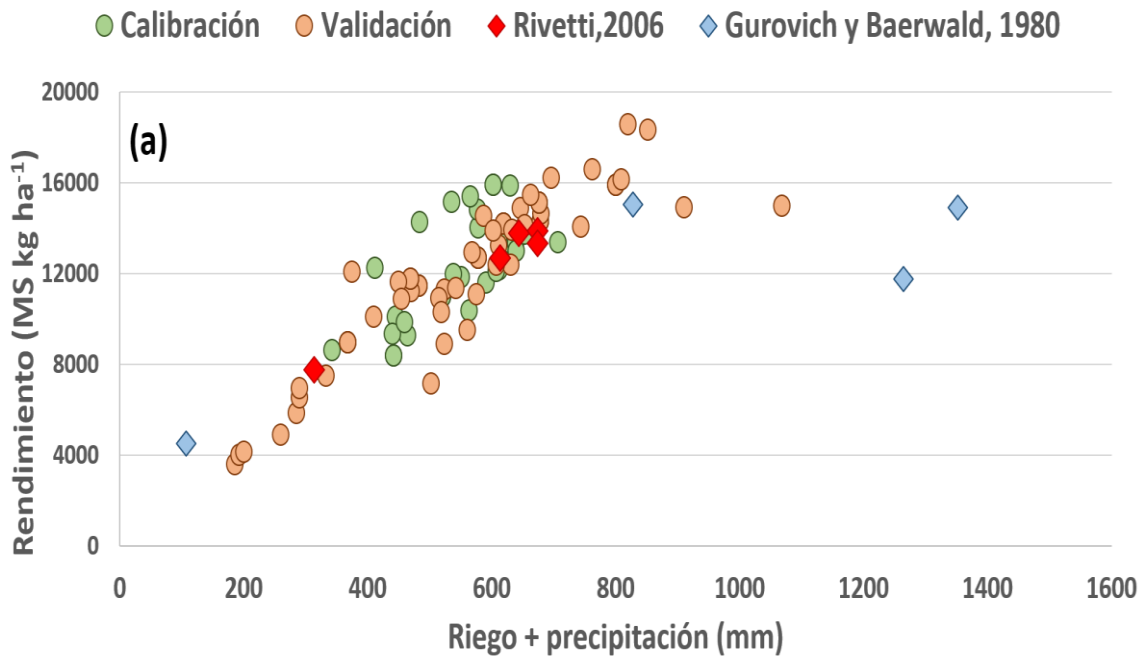


Figura 2. (a) Riego simulado sumado a la precipitación y (b) Absorción de nitrógeno simulada contra el rendimiento de MS englobando a todas las variedades, ambas variables comparadas con la bibliografía.

Tabla 6. Indicadores para medir la capacidad del modelo en representar el IAF estimado por LandSat7, por variedad en las fases de calibración y validación.

Fase del modelamiento	Variedad	PE (n)	Promedio de IAF		% PE con EM>0	Error absoluto (m ² m ⁻²)	Error %
			Estimado	Simulado			
Calibración							
	5	8	3,73	4,50	75,00	1,24	45,98
	6	16	3,61	4,75	37,50	1,39	54,43
	7	5	3,62	5,07	20,00	1,72	61,56
Validación							
	5	18	3,15	3,15	94,44	1,13	38,32
	6	29	3,11	3,56	96,55	1,12	38,58
	7	14	3,11	3,53	85,71	1,30	46,00

3.2. Comparación de la serie climática simulada con datos reales

Existieron buenos resultados del generador climático para la PP, Tx, Tn y HR. En la PP las probabilidades P01 y P11 muestran similitud con las observadas, con un $R^2=0,75$ y $R^2=0,67$; respectivamente y RMSE de 0,12 y 0,15 respectivamente (Figura 3 a-b). SumPP simulada fue similar a la observada también ($R^2=0,89$; RMSE=17,23) (Figura 3 c). La PP muestra un promedio de eventos de lluvia mensual similar a lo observado ($R^2=0,89$; RMSE=2,72) (Figura 3 c). Asimismo, para μ_{PP} se pudo observar un buen ajuste ($R^2=0,73$; RMSE=1,55) (Figura 3 e). Sin embargo, la SPP muestra un ajuste moderado ($R^2=0,53$), aunque un RMSE bajo (3,18) (Figura 3 f).

Por otro lado, μ_{Tx} , μ_{Tn} , como el primer cuartil y tercer cuartil de Tx y Tn son muy similares a los observados con un R^2 de entre 0,97 a 0,99 y un RMSE en un rango de 0,14 a 0,60 (Figura 3 g-i, Figura 4 a-e). Sin embargo, la desviación estándar simulada (STx y STn) posee un ajuste mucho menor que los promedios y los cuartiles. Con un R^2 de 0,50 y 0,46 (Figura 4 a y e) y un RMSE de 0,67 y 0,55 para la STx y STn ; respectivamente.

Por otro lado, $\mu_{Logit(HR)}$ y $S_{Logit(HR)}$ respectivamente, muestra un ajuste aceptable con los datos observados (Figura 4 f-g). Sin embargo, $\mu_{Logit(Rg/Ra)}$ y $S_{Logit(Rg/Ra)}$ simulados tuvieron pésimos resultados, con un R^2 de 0,23 y 0,12, respectivamente; (Figura 4 h-i). No obstante, dichos resultados son producidos por los altos errores observados en estaciones ubicadas al norte de los 31,65°S y en algunas pocas ubicadas

más al sur de dicho valor (Figura 5). Los errores absolutos relativos fueron mayores a 0,30 y 0,20 para $\mu\text{Logit}(Rg/Ra)$ y $S\text{Logit}(Rg/Ra)$, respectivamente. Por lo que tendríamos que ser cuidadosos con los resultados simulados por CropSyst provenientes de dichas estaciones.

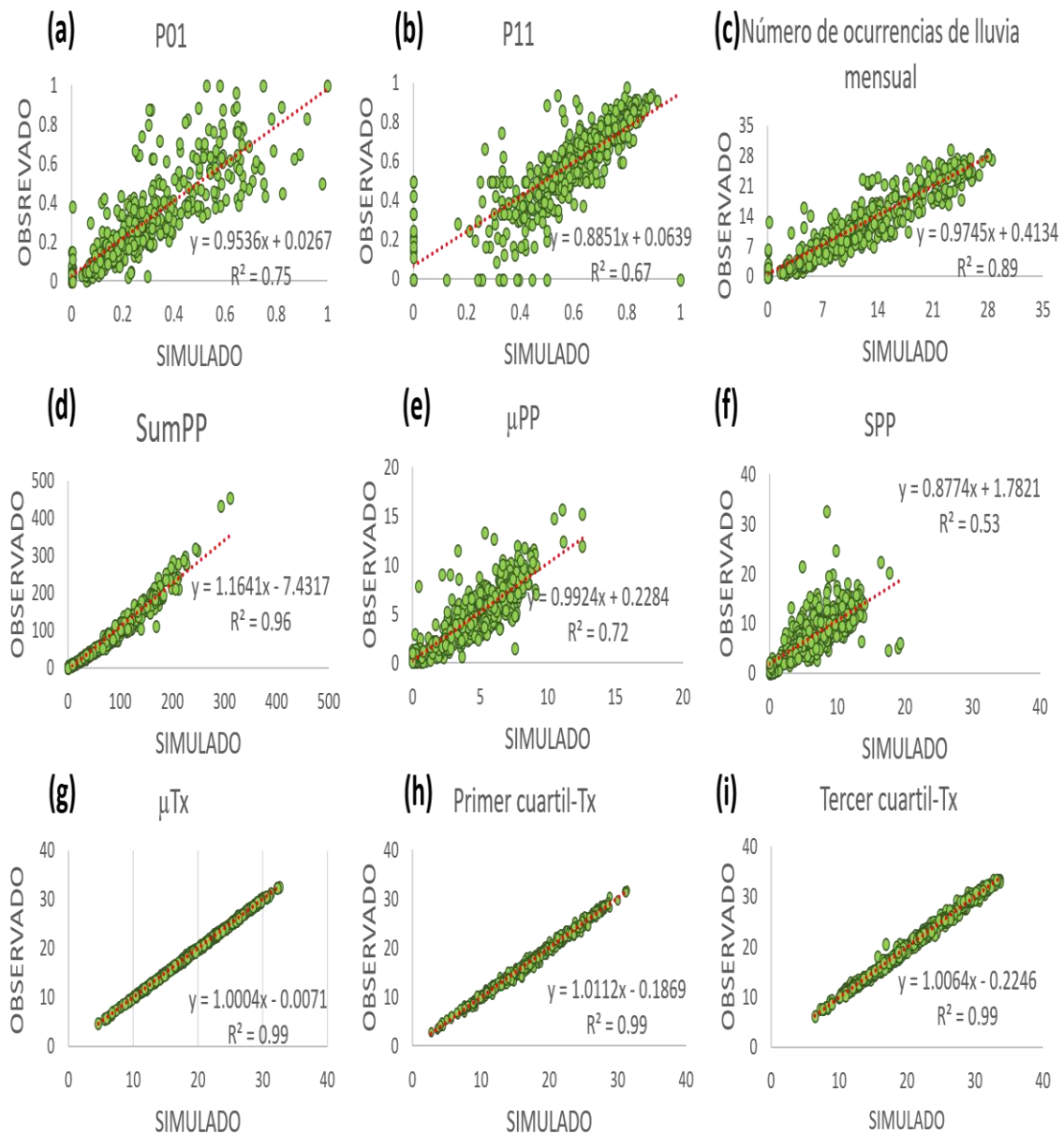


Figura 3. Comparación de estadísticos simulados y observados para la validación del modelo de generador de clima. Estadísticos relacionados a la PP (a-f), a Tx (g-i).

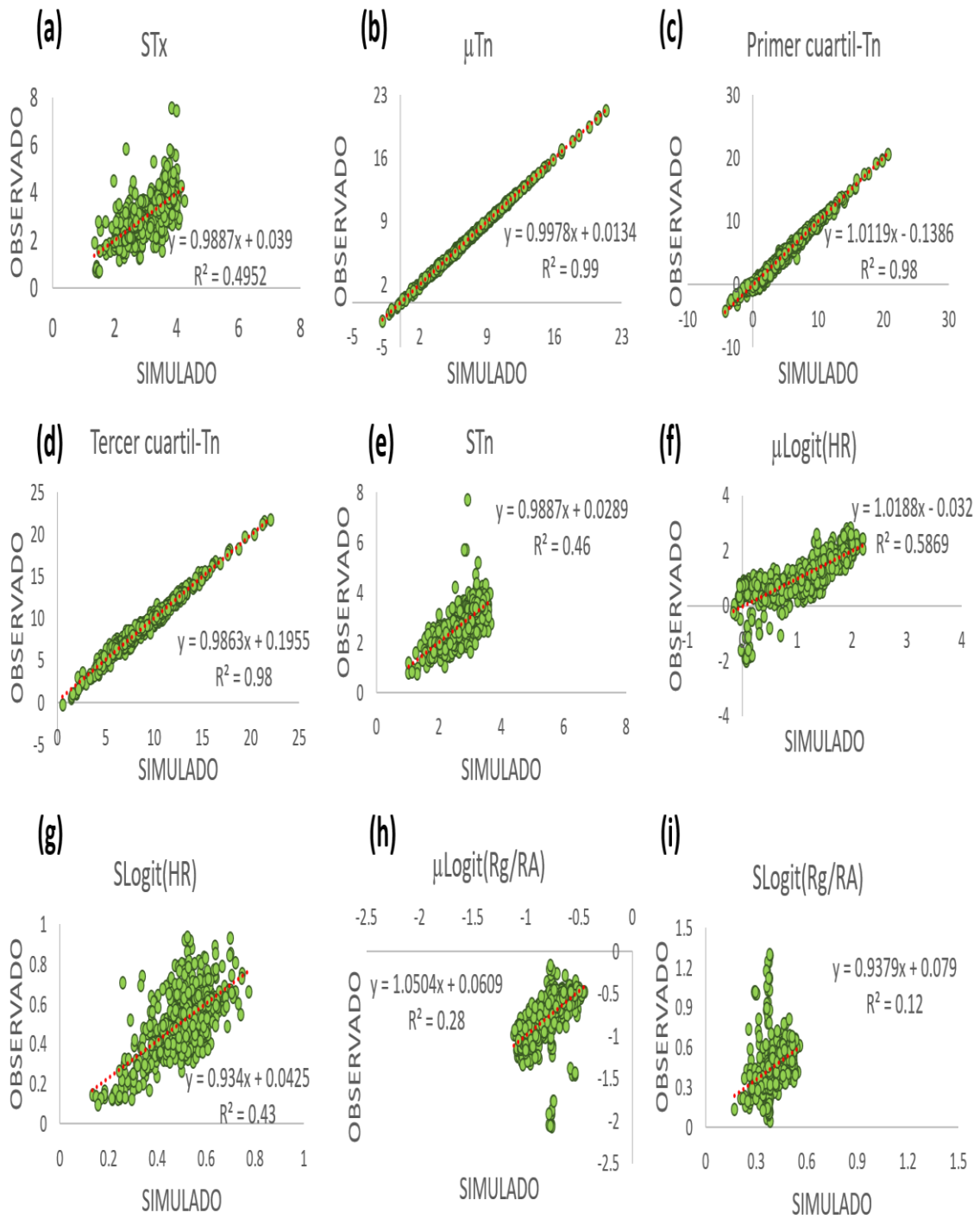


Figura 4. Comparación de estadísticos simulados y observados para la validación del modelo de generador de clima. Estadísticos relacionados a Tx (a), Tn (b-e), HR (f-g) y Rg (h-i).

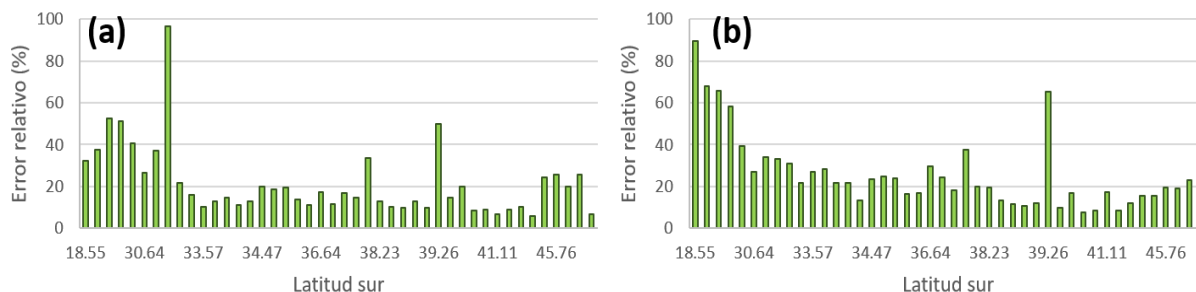


Figura 5. Error relativo del generador de clima para μ Logit(Rg/RA) (a) y SLogit(Rg/RA) (b) en diferentes latitudes de Chile.

3.3. Comparación de los escenarios climáticos RCP 2,6 y RCP 8,5 con el presente en el periodo tradicional del cultivo de maíz

Se consideró “periodo tradicional del cultivo de maíz” a los meses comprendidos entre septiembre a mayo. Por otro lado, los cambios en estos meses no son similares a los observados en el periodo otoño-invierno. Los cambios con respecto al presente fueron la disminución en un 37, 29 y 14 % para la precipitación (zonas norte, centro y sur) y aumento de 4,42°C; 2,60°C y 1,82°C en la temperatura (zonas norte, centro y sur) en el escenario RCP 8,5-2070; menores comparada con los cambios en el periodo de cultivo de maíz.

Los cambios en los meses de septiembre a mayo o periodo del cultivo de maíz se pueden observar en la Tabla 7. En esto meses, en el presente, se acumula alrededor de 27 mm, de 310 mm y 627 mm de lluvia para zona norte, centro y sur de Chile respectivamente. Para el escenario RCP 2,6, año 2050, se observa la mayor disminución, de las precipitaciones comparado al 2030 y al 2070 (4,8 a 6,3%). Sin embargo, se observan aumentos para el periodo 2030 (3,3 a 22,8%) y montos de precipitación cercanos al presente en el 2070. La desviación estándar tuvo los valores mínimos (alrededor del 11%) en el año 2050, esperándose menor probabilidad de acumular montos altos de precipitación. Por otro lado, en el escenario RCP 8,5 se observó una fuerte reducción de las precipitaciones (hasta un máximo de 45,1%) aumentado conforme se aleja del presente. En este escenario la zona central de Chile fue el área más afectada. Asimismo,

la desviación estándar en esta zona disminuyó con respecto al presente hasta 9,8% estabilizándose posteriormente al 2050.

Por otro lado, la temperatura promedio en el periodo tradicional del cultivo de maíz fue de 18,3°C, 15,6°C y 11,9°C para la zona norte, centro y sur de Chile. La temperatura aumentó en el escenario RCP 2,6 y fue mayor en la zona norte de Chile. En todo Chile tuvo su mayor incremento en el año 2050 entre 0,85 a 0,97°C. Además, la desviación estándar descendió (entre 0,02 a 0,11°C) en años cercanos al presente para aumentar en los años posteriores hasta llegar a valores similares a los actuales en la zona norte y centro. En la zona sur, por otra parte, el descenso de la desviación estándar permanece constante (alrededor de los 0,05°C). En otro escenario, el RCP 8,5; los aumentos de la temperatura alcanzaron valores entre 2,2 a 4,3°C en el año 2070. La desviación estándar aumentó con respecto al presente en la zona centro y sur de Chile con rangos de valores entre 0,04 y 0,34°C respectivamente. Sin embargo, se redujo (0,2 a 0,3°C) en todos los años evaluados en la zona norte. No obstante, todas las curvas de DE tuvieron una tendencia a aumentar con respecto al 2030 cuando se alejaban del presente.

3.4. El cultivo de maíz bajo escenarios de cambio climático

3.4.1. Probabilidad éxito para el establecimiento del cultivo de maíz

Para simplificar el análisis consideraremos en esta sección sólo a las variedades 5 y 6, puesto que representan a la más precoz y longeva respectivamente en función a los grados días de desarrollo (diferencia de 167 grados días acumulados). Aunque los datos muestran que estas variedades tienen similar número de días de desarrollo en climas fríos la diferencia de GDA entre variedades puede ser significativo y además provocaría una mayor diferencia en los días de desarrollo entre esas variedades.

El éxito de establecimiento en los diferentes escenarios de cambio climático es mostrado en la Figura 6. El cambio de las condiciones de temperatura del escenario RCP 2,6 no es lo suficientemente intenso como para producir un efecto en el éxito de establecimiento del cultivo de maíz permitiendo su ampliación a latitudes más al sur de Chile, excepto en la variedad precoz, aunque sólo cuando fue sembrada el 05 de octubre y en el año 2050. Por otro lado, en el año 2070 bajo un escenario RCP 8,5 la variedad precoz pudo

establecerse en más puntos de simulación que la variedad tardía hasta la latitud $46,54^{\circ}$ S (Aysén). Sin embargo la variedad tardía solo pudo establecerse hasta la latitud $37,15^{\circ}$ S en el mismo año y escenario.

Tabla 7. Variación entre el presente y escenarios futuros (RCP 2,6 y RCP 8,5) de la suma de precipitación (SumPP), temperatura promedio (T°) y desviación estándar (DE) de ambas variables.

Zona	Escenario	Año	SumPP	DE de SumPP	T°	DE deT°
Norte						
	Presente	-	27,09 mm	18,52 mm	18,28 °C	2,84 °C
	RCP 2,6	2030	22,78	27,09	0,69	-0,11
		2050	-6,34	-6,86	0,97	-0,08
		2070	5,48	4,79	0,42	-0,06
	RCP 8,5	2030	-8,10	-11,85	1,64	-0,33
		2050	-39,83	-40,79	3,45	-0,34
		2070	-23,38	-24,75	4,31	-0,18
Centro						
	Presente	-	310,04 mm	184 mm	15,56 °C	3,81 °C
	RCP 2,6	2030	7,23	-0,85	0,50	-0,11
		2050	-4,75	-9,80	0,85	-0,09
		2070	2,26	-0,76	0,44	-0,02
	RCP 8,5	2030	-9,78	-12,27	0,90	-0,01
		2050	-39,86	-33,03	2,29	0,06
		2070	-45,14	-36,23	2,92	0,14
Sur						
	Presente	-	626,98 mm	287,03 mm	11,86 °C	3,53 °C
	RCP 2,6	2030	3,28	-2,08	0,56	-0,04
		2050	-4,89	-6,37	0,88	-0,05
		2070	-3,26	-4,59	0,44	-0,05
	RCP 8,5	2030	-5,70	-10,04	0,73	0,05
		2050	-23,32	-25,94	1,70	0,20
		2070	-29,36	-36,00	2,24	0,34

Los valores de los periodos 2030, 2050, y 2070 corresponden a los cambios con respecto al presente (resaltado en negritas). Los cambios son porcentuales y diferenciales para las variables relacionadas a la PP y T°.

3.4.2. Efecto del cambio en la producción y calidad del cultivo de maíz

Se abordó de forma conjunta a la variedad precoz y tardía en la evaluación del rendimiento (Figura 7) y la calidad (Figura 8) respectivamente. En esta etapa solamente consideramos al promedio de los puntos de simulación que se sitúan en la región de Coquimbo (IV) para representar a la zona norte, donde actualmente se siembra maíz de una manera importante en Chile.

Los rendimientos simulados para el período presente mostraron un rango entre 12552-13456 kg ha⁻¹ y 12868-14284 kg ha⁻¹ para la zona norte y centro de Chile, respectivamente. Se observa una reducción de los rendimientos hacia fechas de siembra posteriores al 25 de setiembre. Los cambios porcentuales fueron muy similares cuando comparamos las fechas de siembra, independientemente del escenario y año evaluados. La disminución del rendimiento para el escenario RCP 8,5 y año 2070 fue del 20,65%-21,28% y del 8,97%-9,76% para las zonas norte y centro de Chile. Sin embargo, en el escenario RCP 2,6 los cambios porcentuales fueron pequeños siendo la mayor reducción el año 2050 con un rango entre 0,66%-1,39%.

La DE del rendimiento en el escenario RCP 2,6 mostró valores cercanos a los observados en el presente. Por otra parte, en el escenario RCP 8,5 la DE tiende a reducirse en la zona norte de Chile, a pesar que aumenta en la zona central. El valor de la DE en el escenario RCP 8,5-2070 estuvo en un rango entre 1284-1553 kg ha⁻¹ en la zona norte, partiendo de un valor presente entre 1398-2095 kg ha⁻¹. Por otra parte, la DE en la zona central incrementó hasta un valor entre 1562-1940 kg ha⁻¹, con valores en el presente 1261-1473 kg ha⁻¹.

Por último, el coeficiente de asimetría se ubicó dentro del rango de -0,50 al 0,50 indicando que la distribución conjunta de ambas variedades en una determinada zona de Chile tiende a la simetría sin importar los escenarios y fechas siembra.

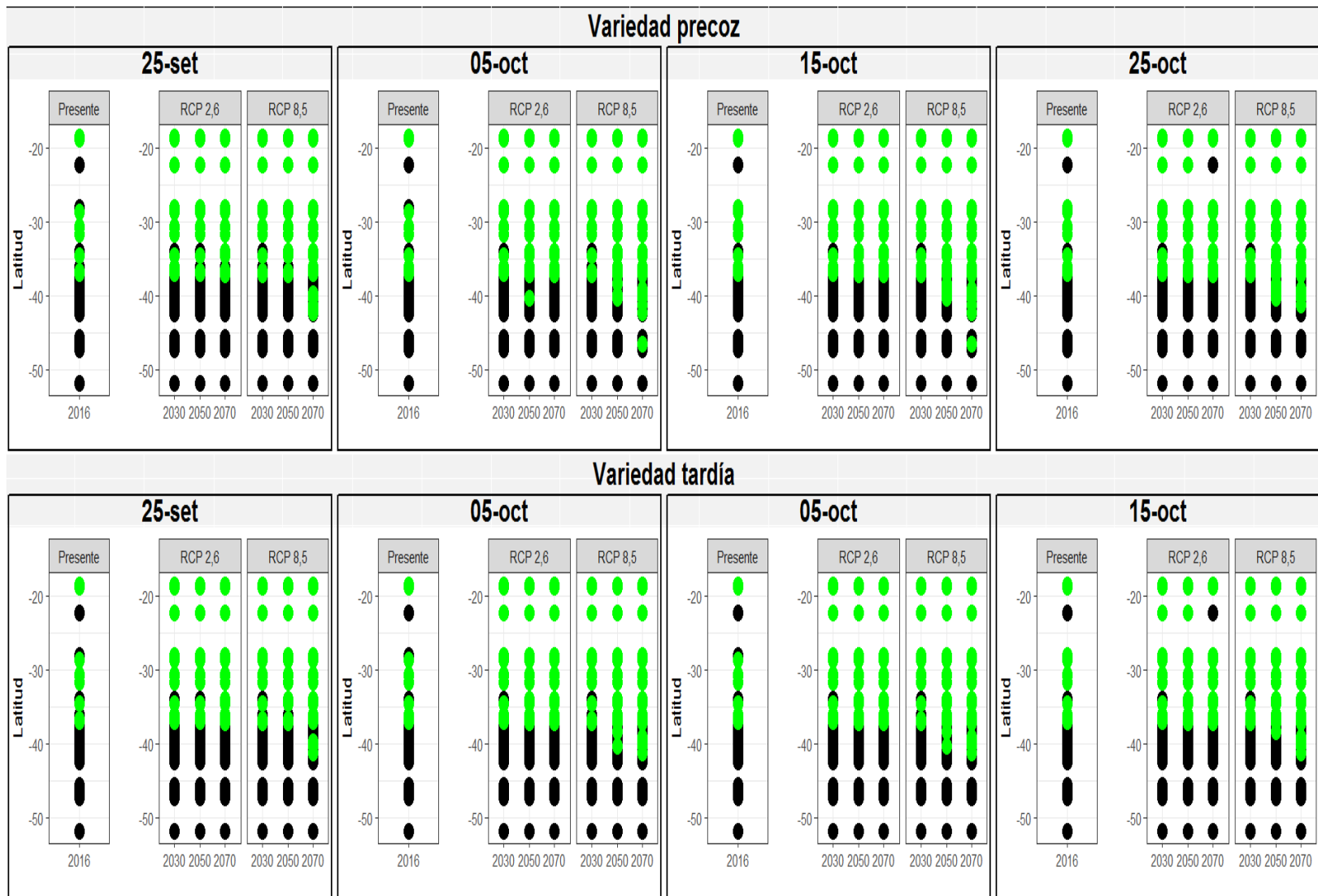


Figura 6. Éxito de establecimiento del cultivo de maíz precoz y tardío en diferentes fechas de cultivo en el presente y escenarios de cambio climático (RCP 2,6 y RCP 8,5).

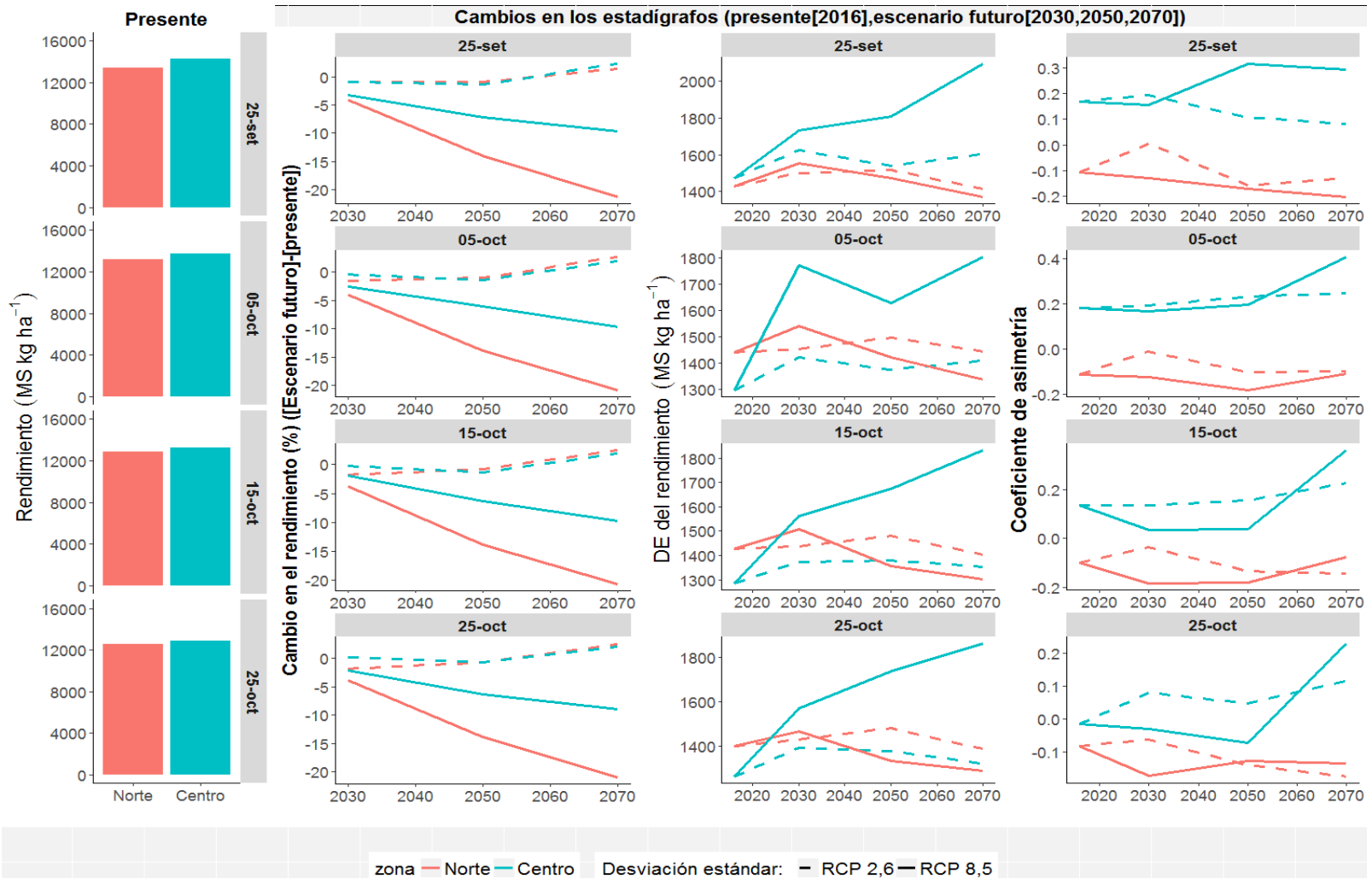


Figura 7. Cambios en los estadígrafos del rendimiento del cultivo de maíz englobando a las variedades de desarrollo precoz y tardío en diferentes fechas de siembra ya bajo escenarios de cambio climático (RCP 2,6 y 8,5) en diferentes años de evaluación.

En cuanto a la calidad del cultivo de maíz los valores en el presente de N:MST estuvieron en un rango entre los 9,77-10,71 g kg⁻¹. La concentración de N:MST fue similar al presente en el escenario RCP 2,6; tanto en la zona norte y sur de Chile como en los diferentes años evaluados, tal como fue comentado con el rendimiento. Las mayores diferencias se observaron en el escenario RCP 8,5. Siguiendo una tendencia contraria a la del rendimiento tanto en la zona norte y centro. El incremento fue de 3,0% a 3,5% en la zona norte en el año 2070. Así también, en la zona central fue de 0,06% en la fecha de siembra del 25 de septiembre y en fechas posteriores en un rango de entre 1,5% a 2,2%.

Los valores presentes de la desviación estándar en la zona norte fueron de 0,21-0,24 g kg⁻¹ de N:MST y en la zona central de 0,79 a 0,81 g kg⁻¹ de N:MST. La desviación estándar de N:MST en el escenario RCP 2,6 se mantuvo cercano a los valores del presente. Sin embargo, en el escenario RCP 8,5 (2070) incrementó hasta valores de 0,42-0,49 g kg⁻¹ de N:MST en la zona norte. Además, el incremento en la zona central solo fue mayor en la fecha de siembra del 25 de setiembre y 05 de octubre llegando a un valor de 0,91-0,96 g kg⁻¹ de N:MST y en las fechas de siembra restantes en un rango entre 0,81 a 0,85 g kg⁻¹ de N:MST.

El coeficiente de asimetría para N:MST tuvo valores frecuentemente fuera del rango del -0,5 a 0,5. Entonces la distribución es moderadamente asimétrica hacia la derecha en la zona central y tiende moderadamente hacia izquierda en la zona norte. Por último, se observó que la fecha de siembra del 05 de octubre con mejores estimaciones de rendimientos y calidad, por lo que se procedió a evaluar a nivel local en las siguientes secciones.

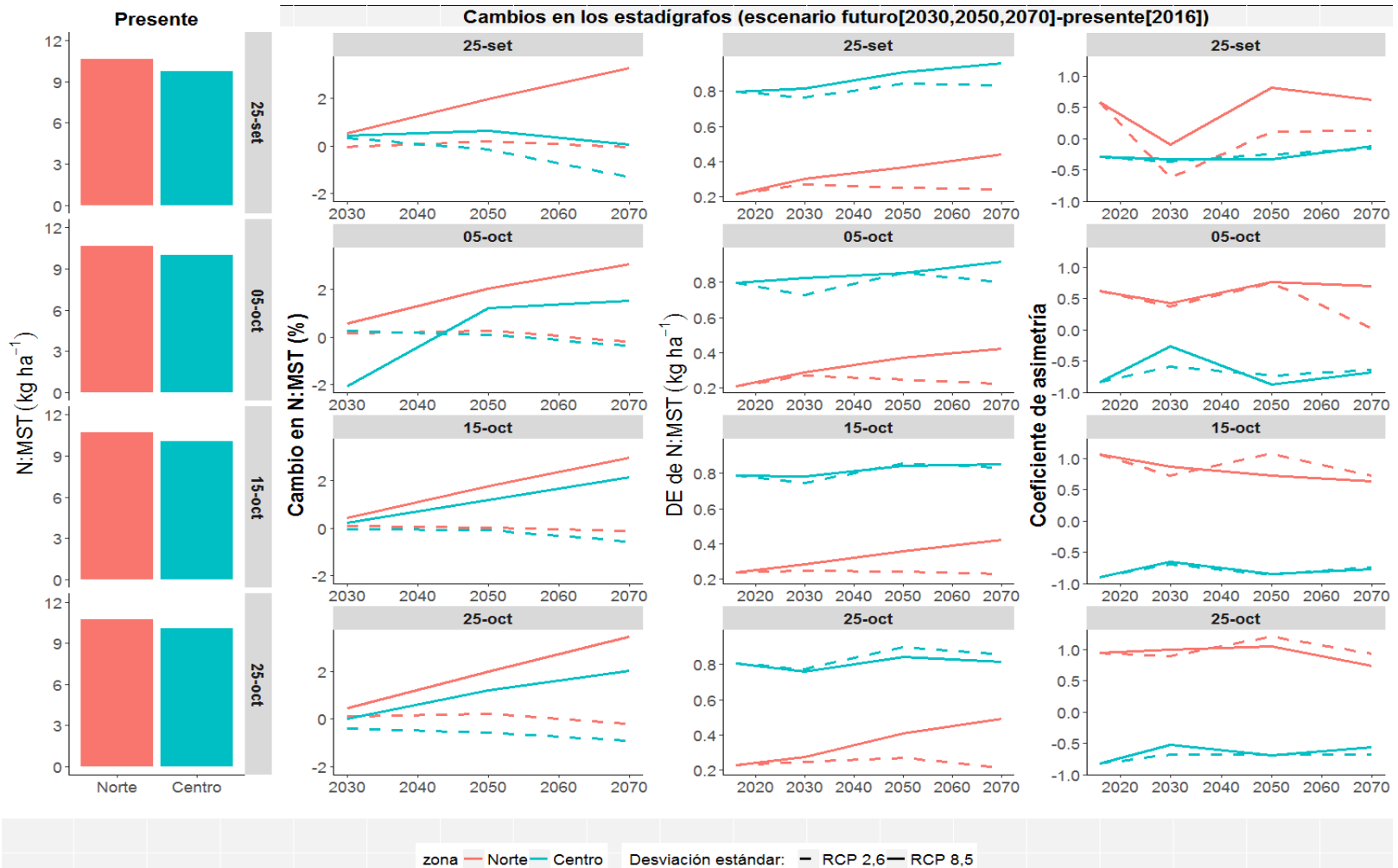


Figura 8. Cambios en los estadígrafos de la calidad del cultivo de maíz englobando a las variedades de precoz y tardía en diferentes fechas de siembra ya bajo escenarios de cambio climático (RCP 2,6 y 8,5) en diferentes años de evaluación.

Por otro lado, algunas relaciones entre las variables de duración del cultivo, MST, absorción de N y transpiración fueron evaluadas de las simulaciones provenientes de la fecha de siembra del 05 de octubre para la variedad precoz (Figura 9) y tardía (Figura 10). En las Figura 9 y Figura 10 se compararon el presente y el escenario RCP 8,5 para facilitar la observación de los cambios. La forma en que se relacionaron las variables se repitieron en ambas variedades. Fue observado una fuerte relación entre la MST con la duración del cultivo (fila1 Figura 9 y Figura 10). La nube de puntos separada del presente en el año 2070-RCP 8,5 corresponde a los valores del punto de simulación ubicado en la latitud 36,91 (región VIII), donde la biomasa permaneció similar con respecto al presente. Entonces la separación fue producida por la reducción de MST en el resto de puntos de simulación en el escenario RCP 8,5.

De otro lado, la misma MST del maíz pudo ser logrado con diferentes valores de absorción del N (fila 2 Figura 9 y Figura 10). También, al relacionar MST con N:MST la dispersión de puntos aminoró concentrándose en los valores tope de N:MST (fila 3 Figura 9 y Figura 10). Entonces, observar al máximo valor de N:MST para una determinada MST fue más probable cuando los rendimientos fueron menores. Esto fue evidente al comparar el escenario RCP 8,5 del año 2070 con los escenarios más benignos (presente, escenario RCP 2,6 y años 2030 y 2050 de RCP 8,5). Por otro lado, el incremento de la transpiración se relacionó al aumento de MST. Sin embargo la formación de nubes de puntos con baja transpiración y alto MST (fila3 Figura 9 y Figura 10) fueron observados también en el punto de simulación ubicado en el 36,91 (región VIII), esto probablemente se debió a valores similares entre transpiración real y potencial. Se observó también que a mayor transpiración fue inexistente un aumento de N:MST (fila4 Figura 9 y Figura 10), ya que existe casi la misma N:MST en diferentes valores de transpiración, asimismo aumentó la varianza hacia valores inferiores de N:MST conforme incrementó la transpiración. De otro lado se apreció una relación entre el aumento de la temperatura y el CO₂ con el incremento de la calidad del cultivo (Figura 11).

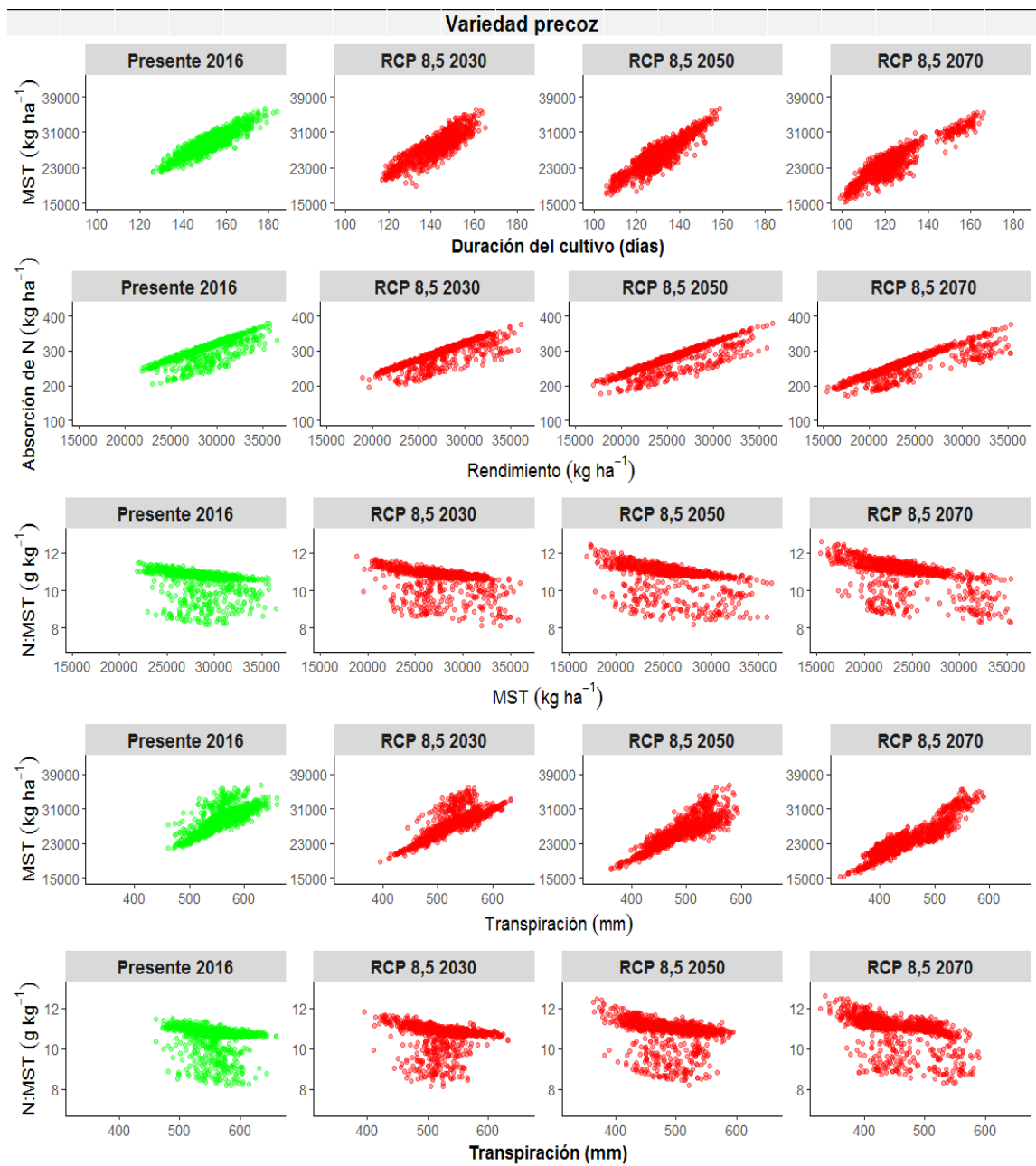


Figura 9. Relación entre diferentes variables provenientes de los puntos de simulación en la variedad precoz sembrada el 05 de octubre realizado en el presente (puntos verdes) y escenario RCP 8,5 (puntos rojos) en los años 2030, 2050 y 2070.

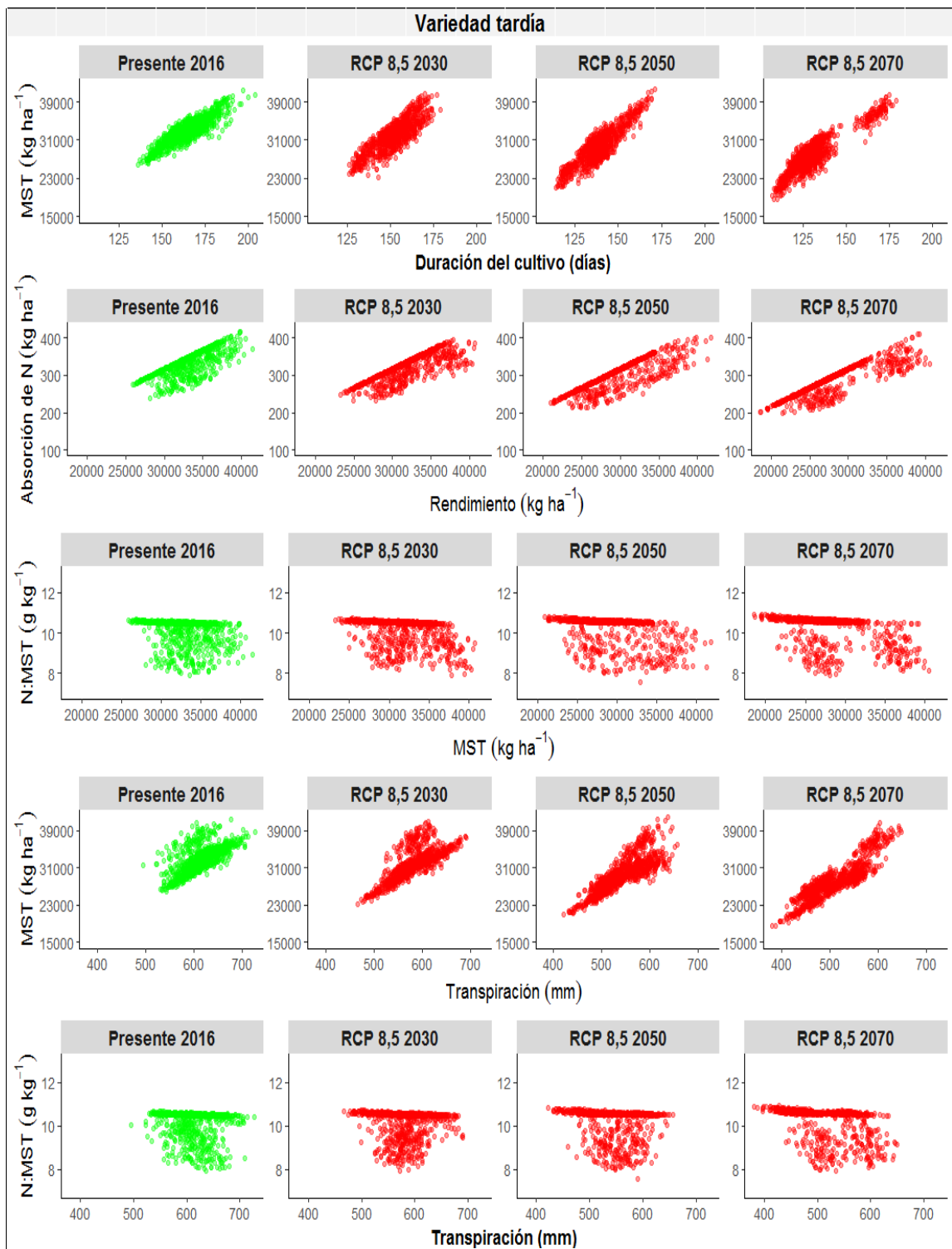


Figura 10. Relación entre diferentes variables provenientes de los puntos de simulación en la variedad tardía sembrada el 05 de octubre realizado en el presente (puntos verdes) y escenario RCP 8,5 (puntos rojos) en los años 2030, 2050 y 2070.

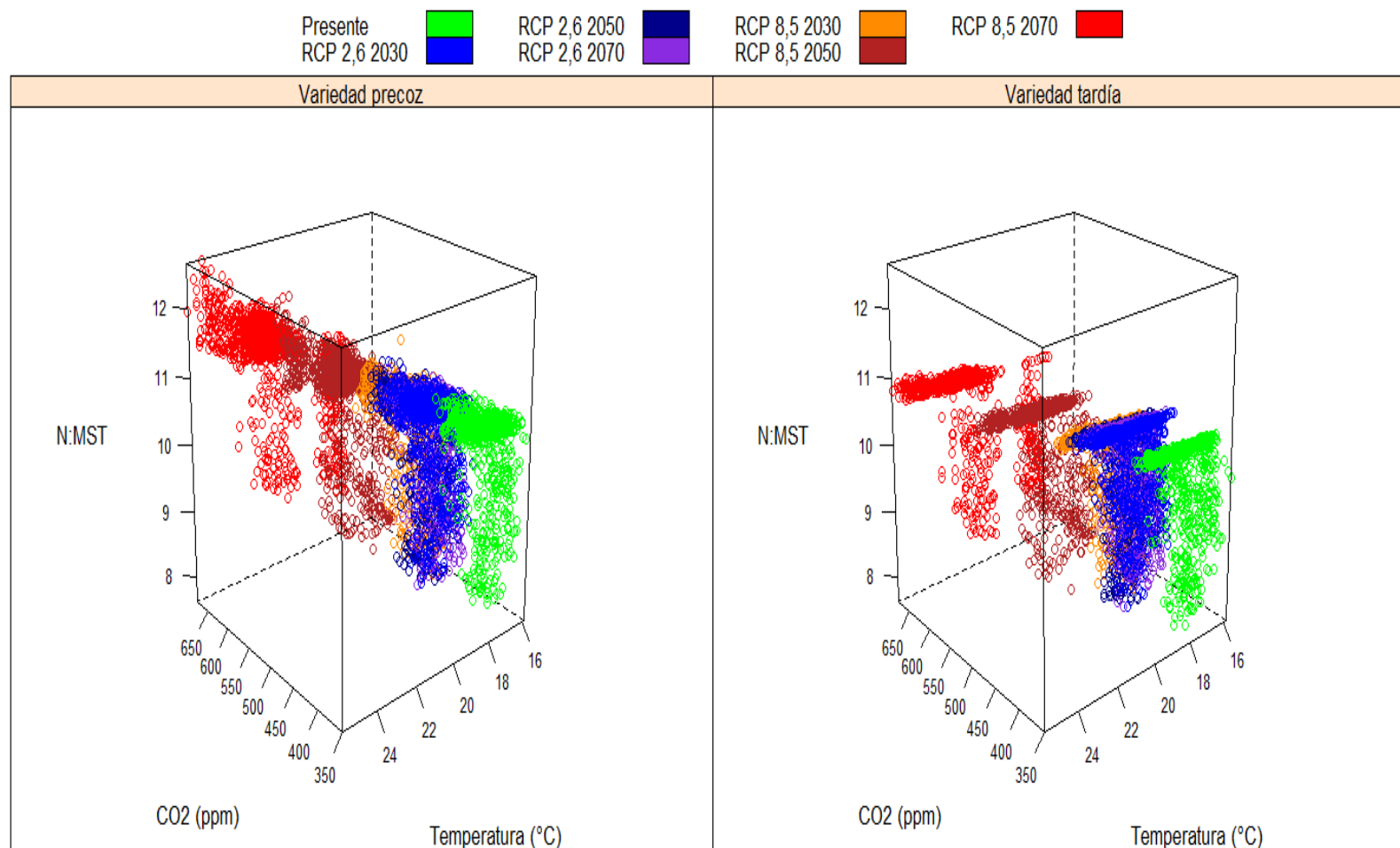


Figura 11. N:MST (g kg^{-1}) y su relación con la concentración de CO_2 y la temperatura en el presente y escenarios de cambio climático RCP 2,6 y RCP 8,5 en los años 2030, 2050 y 2070.

3.4.3. Riesgo de sub-producción del cultivo de maíz y cambio en la calidad a nivel local

Comparación con el presente

Como se observa en la Figura 12 el escenario RCP 8,5 vulneró la producción de maíz produciendo un desplazamiento hacia la izquierda de las curvas de frecuencia relativa acumulada del rendimiento (15% de humedad del grano), es decir, reducción de los rendimientos con respecto al presente. El desplazamiento es mayor en el año 2050 y 2070 de dicho escenario, aunque sólo hasta la latitud 36,64° S perteneciente a la región del Biobío donde el desplazamiento de las curvas es reducido, siendo esta región menos afectada por el cambio climático.

El escenario RCP 2,6 no produce cambios notorios. Además, con frecuencia se observaron entrecruzamientos o superposición de segmentos de la curva de frecuencia relativa acumulada del escenario RCP 2,6 con la que representa el presente. De otro lado, solo la curva del escenario RCP 2,6 del año 2070, produce desplazamientos pequeños de la curva de rendimiento hacia la derecha indicando leves mejoras en dicho escenario. Esta metodología de análisis de rendimientos como curvas de frecuencia acumuladas relativas nos sirvió para analizar la sensibilidad del cultivo a pérdidas económicas. La comparación con el rendimiento de 14427 kg ha⁻¹ (donde la ganancia neta fue igual a cero) indicó que el maíz precoz puede poseer pérdidas económicas en más localidades que la variedad tardía. Aunque se considera que el rendimiento estimado como indicador es alto con respecto a estimaciones de años pasados (datos nos mostrados) la variedad tardía posee riesgos de pérdidas económicas del 0% casi en la totalidad de puntos evaluados en los escenarios presente y RCP 2,6 sin importar los años evaluados siendo mayor la probabilidad en latitudes más australes (Figura 12 y Tabla 8). Sin embargo, en el escenario RCP 8,5 es más frecuente encontrar localidades con pérdidas económicas en los años 2050 y 2070 en la zona norte de Chile con probabilidades del 23 al 100% englobando ambas variedades. De igual manera, las pérdidas económicas en la variedad precoz fueron observadas incluyendo el presente, en todos los escenarios y años evaluados, además de pérdidas frecuentes a partir del periodo 2030, aunque estos resultados no son mostrados en los ejemplos dados en la Figura 12 y Tabla 8. En la parte centro-sur de Chile variedad tardía fue menos vulnerable

a presentar pérdidas económicas (0-20 %) comparada a las pérdidas económicas de la variedad temprana (76 a 100%).

Tabla 8. Porcentaje de riesgo de pérdidas económicas de las dos variedades evaluadas en diferentes escenarios y periodos de cambio climático.

Latitud y región	Presente	RCP 2,6			RCP 8,5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
Variedad precoz							
31,65 (IV)	20,00	30,00	33,33	16,67	23,33	100,00	100,00
34,47 (VI)	72,41	83,33	73,33	43,33	100,00	100,00	100,00
35,96 (VII)	28,57	42,86	58,62	34,48	-	80,00	100,00
36,64 (VIII)	73,33	70,00	70,00	46,67	75,86	80,00	100,00
Variedad tardía							
31,65 (IV)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,33	80,00
34,47 (VI)	0,00	3,33	0,00	0,00	26,67	70,00	96,67
35,96 (VII)	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	20,00
36,64 (VIII)	0,00	0,00	0,00	0,00	3,45	3,33	20,00

(-) El cultivo no se estableció

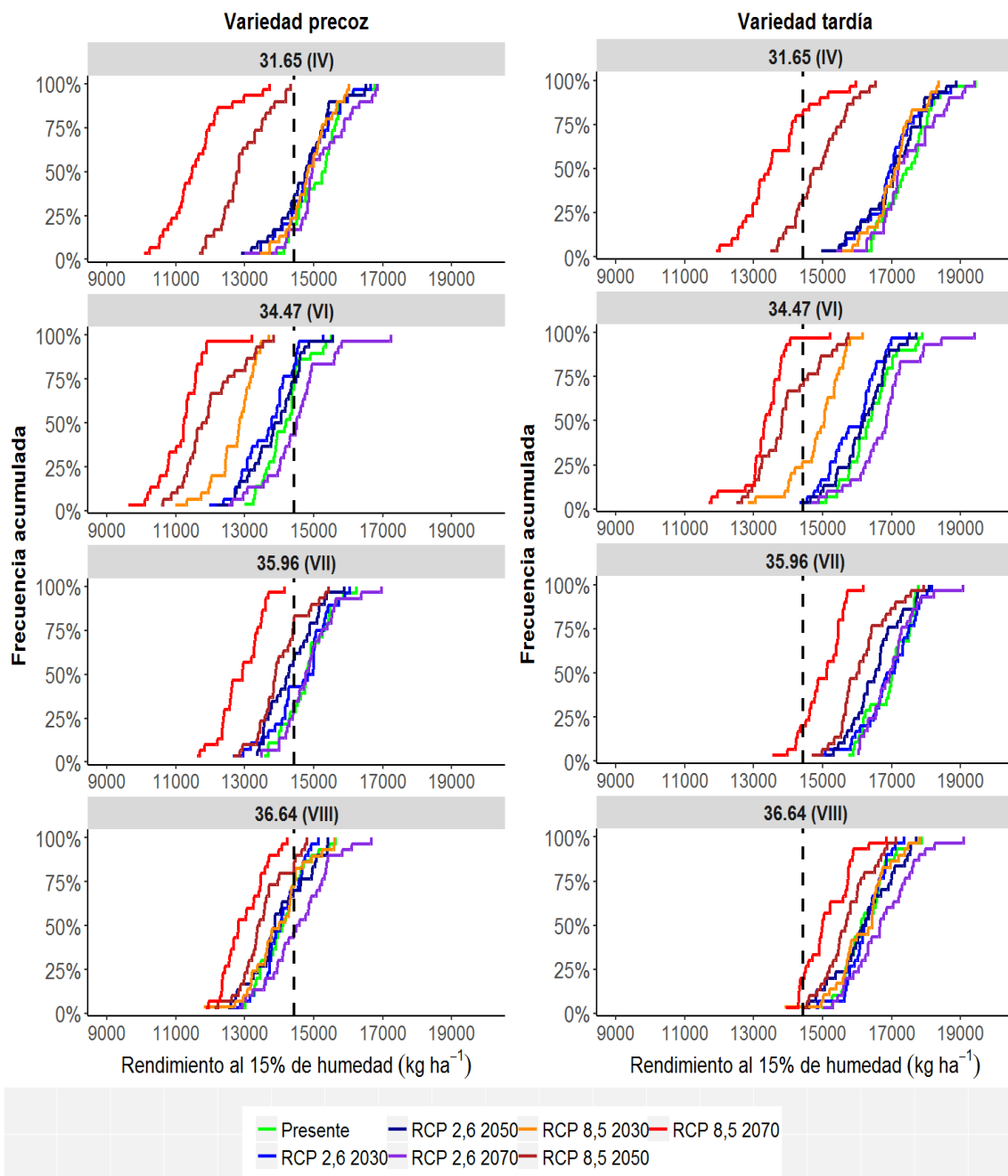


Figura 12. Frecuencia relativa acumulada para los rendimientos (kg ha⁻¹). Las etiquetas en la parte superior indican la latitud sur y entre paréntesis el número de región. La línea negra vertical indica el valor del rendimiento donde existe una ganancia neta igual a cero.

Sobre la calidad del cultivo a nivel local (Figura 13) y en condiciones óptimas de riego y fertilización, se observó que las curvas de frecuencia acumulada que representan la concentración de N:MST en el escenario RCP 2,6 fueron cercanas al presente. Esto indicó que la calidad probablemente no será afectada en alguno de los años evaluados de dichos escenarios, ya sea en la variedad precoz y tardía. De otro lado en el escenario RCP 8,5 las curvas de frecuencia acumulada de los años 2050 y 2070 se desplazaron hacia la derecha, sobre todo en puntos de simulación que correspondieron a las regiones IV para la variedad precoz. Sin embargo, en la variedad tardía no hubo un desplazamiento tan grande. Por el contrario, las curvas RCP 8,5-2050 y RCP 8,5-2070 se dispusieron cercanas al presente junto con las restantes. También en la variedad de tardía, escenario RCP 8,5, existió una acumulación rápida de los valores de N:MST en un rango acotado, en los puntos de simulación pertenecientes a la región VIII. Esperándose entonces valores de N:MST más constantes con respecto al presente en dichas condiciones.

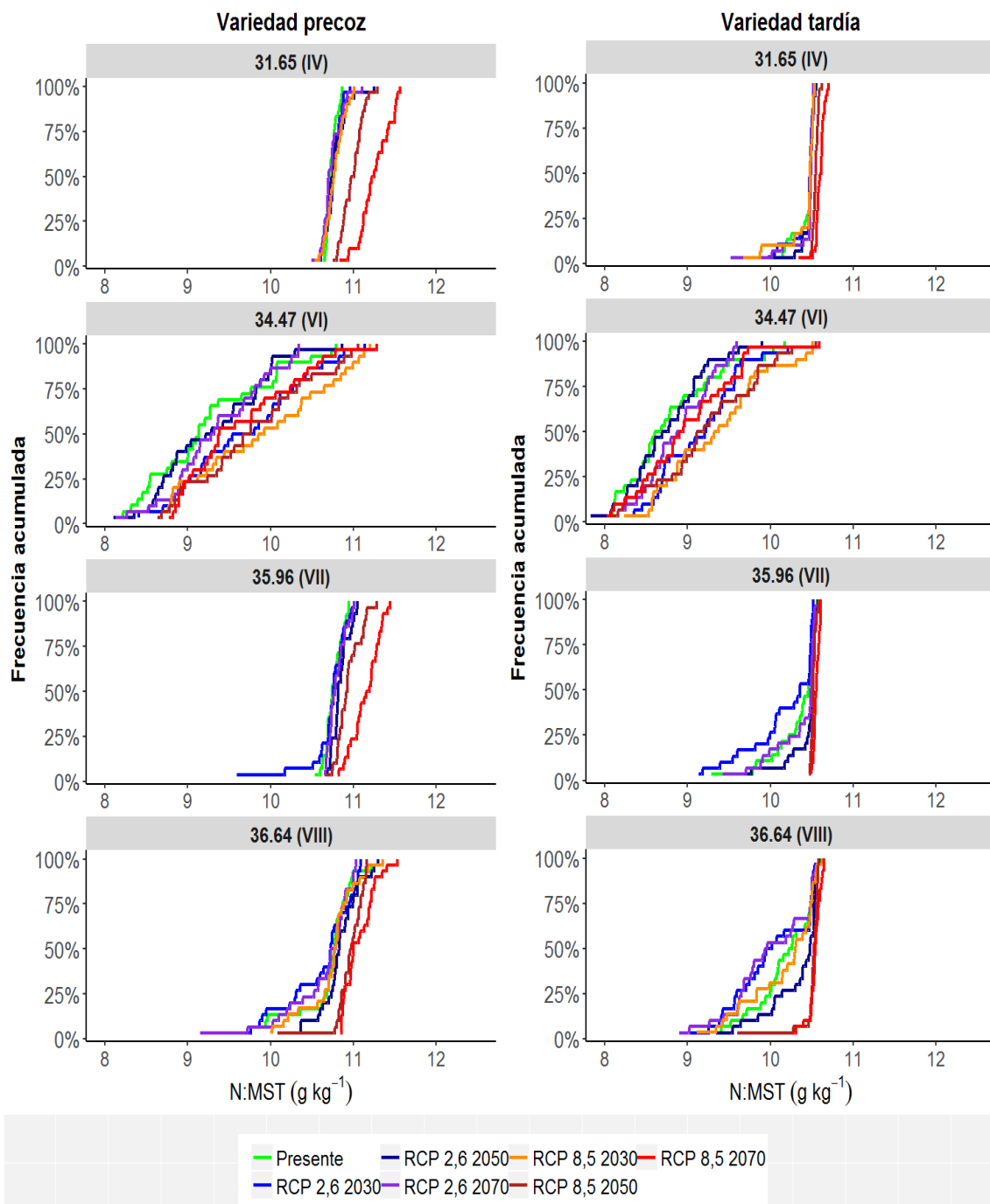


Figura 13. Frecuencia de distribución acumulada para la calidad del maíz (N:MST). Las etiquetas en la parte superior indican la latitud sur y entre paréntesis el número de región.

Observación en áreas nuevas

Los rendimientos en áreas nuevas fueron menores en puntos de simulación cercanos a los 27,96° con un rango de 6354-10677 kg ha⁻¹ y 7953-12681 kg ha⁻¹ para la variedad de precoz y tardía, incrementándose hacia latitudes inferiores y superiores. La posibilidad de poder sembrar en zonas más cercanas a la cordillera aumenta entre las latitudes de 22,32° a 37,01° S para las variedades precoz y tardía. Además, los rendimientos como la probabilidad de ganancia son siempre mayores en la variedad tardía que la precoz como se muestra en los ejemplos de la Figura 14 y Tabla 9. A partir de la región VIII y al sur de ésta se encontraron áreas nuevas con mayor posibilidad de que el cultivo de maíz se desarrolle sin problema y con ganancias económicas (rendimientos por encima de los 14427,78 kg ha⁻¹) para ambas variedades indiferente del escenario y periodo evaluado (Tabla 9). Al norte de los 37,01° LS es incierto la clase de escenarios o el año evaluado que puede provocar una ganancia económica del cultivo de maíz. Se observó también en la zona norte frecuentemente una mayor probabilidad de pérdidas económicas en un escenario RCP 8,5 en los años 2050 y 2070 en la variedad precoz, no obstante ganancias en la variedad tardía en los mismos años y escenario comentado. Asimismo, es menor la probabilidad de pérdidas económicas frecuentemente en el año 2070 del escenario RCP 8,5 al sur de los 37,15° LS hasta los 41,11°LS. En la variedad tardía las probabilidades de pérdida económica fueron de 0% y la variedad precoz tuvo probabilidades de 0 a 30% (Tabla 9).

El valor de N:MST fue mayor en latitudes cercanas a los 27,96° entre 11,47-12,43 g kg⁻¹ y 10,65-10,85 g kg⁻¹ en promedio para la variedad precoz y tardía respectivamente en los distintos años y escenarios evaluados (Figura 15). El valor de calidad de maíz siguió un comportamiento contrario al rendimiento encontrándose mayores valores de calidad en menores rendimientos. De otro lado en el escenario RCP 8,5 se observaron desplazamientos a la derecha de las curvas de frecuencia acumulada, es decir, mayores valores de N:MST. Hubo también menores variaciones comparado al escenario RCP 2,6 en el mismo punto de simulación. Además los valores de N:MST en el escenario RCP 8,5 incrementaron conforme los años se alejaban del presente.

Tabla 9. Porcentaje de riesgo de pérdidas económicas de las dos variedades evaluadas en diferentes escenarios y periodos de cambio climático sobre áreas nuevas.

Latitud y región	RCP 2,6			RCP 8,5	
	2050	2070	2030	2050	2070
Variedad precoz					
37,15 (VIII)	6,67	3,33	6,67	33,33	56,67
39,79 (XIV)	-	-	-	0,00	0,00
41,11 (X)	-	-	-	-	3,33
46,54 (XI)	-	-	-	-	30,00
Variedad tardía					
37,15 (VIII)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
39,79 (XIV)	-	-	-	-	0,00
41,11 (X)	-	-	-	-	0,00

(-) El cultivo no se estableció.

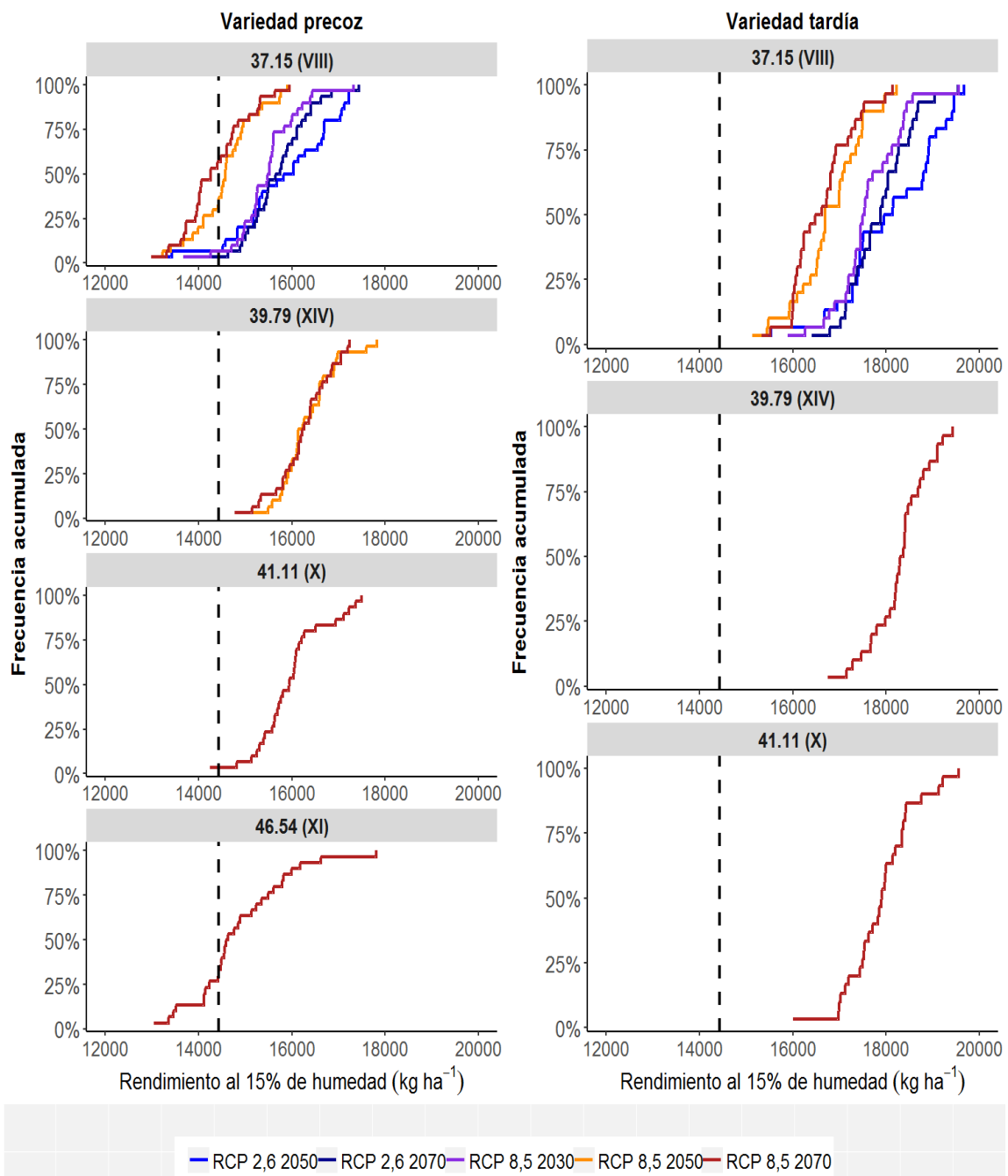


Figura 14. Frecuencia acumulada relativa para el rendimiento del maíz (kg ha^{-1}) en áreas nuevas. Las etiquetas en la parte superior indican la latitud sur y entre paréntesis el número de región. La barra negra indica el valor del rendimiento donde existe una ganancia neta igual a cero.

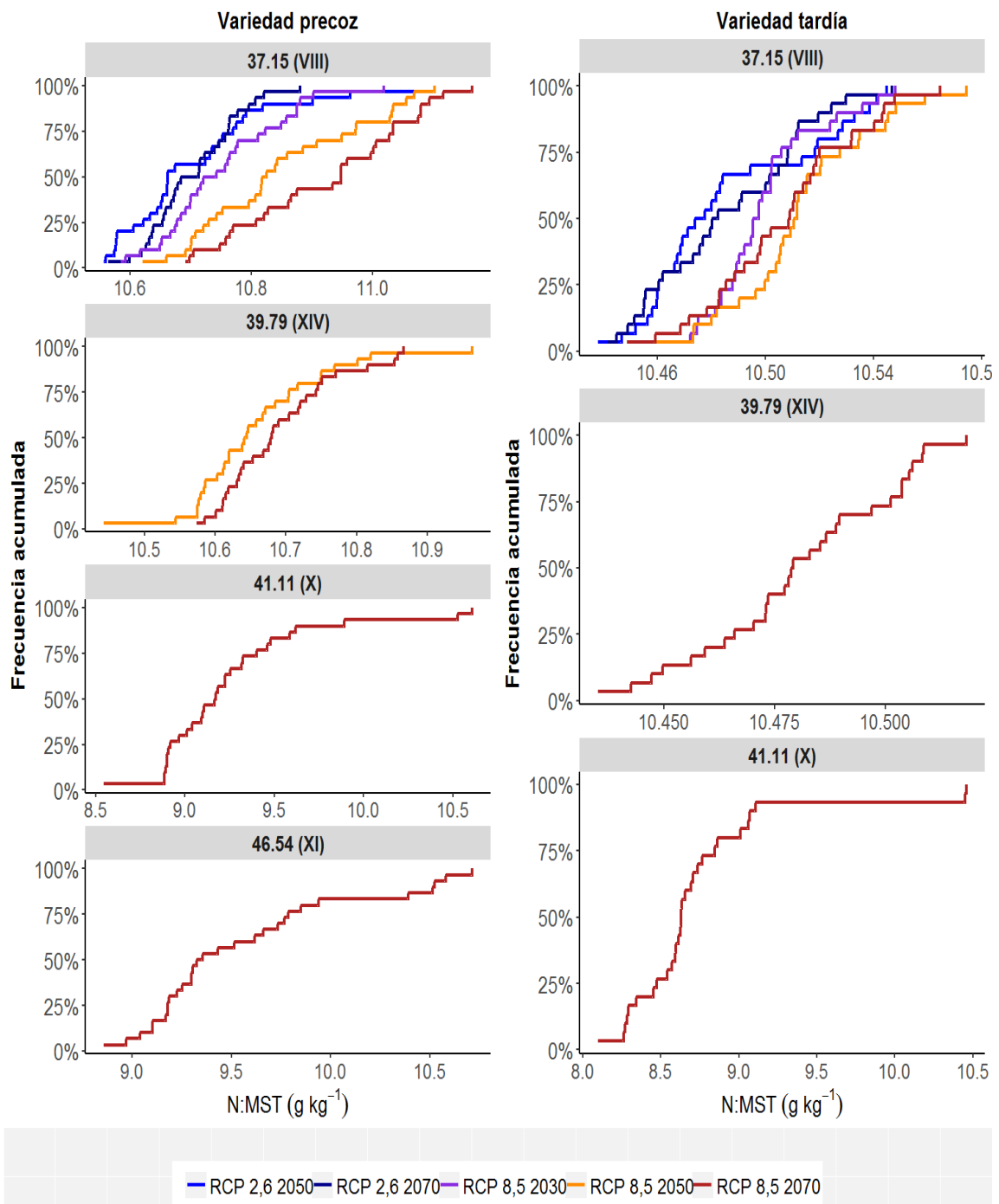


Figura 15. Frecuencia acumulada relativa para la calidad del maíz (N: MST) en áreas nuevas. Las etiquetas en la parte superior indican la latitud sur y entre paréntesis el número de región.

3.4.4. Riesgo de temperaturas perjudiciales y estimación de montos de agua en estados críticos de desarrollo del maíz

La probabilidad de que existan temperaturas dañinas para el cultivo de maíz fue alta en el escenario RCP 8,5 año 2070 para ambas variedades (filas 1 y 2 de las Figura 16 y Figura 17). Los valores fueron máximos en cercanías a los 30° a 37°LS (zona central de Chile). Estos valores de probabilidad fueron de 0,15 y 0,30 para la etapa de floración y llenado de grano respectivamente en ambas variedades y de forma conjunta de 0,22. En los puntos de simulación cercanos y al sur de los 39°LS (región XIV) las probabilidades de ocurrencia de altas temperaturas fueron muy bajas en ambas fases críticas del desarrollo del maíz (floración y llenado de grano). El escenario RCP 2,6 (2030 y 2050) posee probabilidades más bajas con respecto al escenario RCP 8,5 (2050 y 2070). Sin embargo, podría tomar valores cercanos al 0,10 en ambas variedades en localidades contiguas a los 28°LS (región IV) y 35,00°LS (regiones VI-VII).

La contribución de la precipitación al agua necesaria para el desarrollo óptimo del cultivo de maíz fue mayor al 5 % a partir de los 33°LS tanto en el presente como en los escenarios futuros (fila 3 Figura 16 y Figura 17). Esta llegó a valores hasta del 40 % del agua demandada por el cultivo tanto el escenario RCP 2,6 y RCP 8,5 frente al valor de 25 % alcanzado en el presente. Sin embargo, la latitud en donde se aproxima al máximo valor es diferente en ambos escenarios con 37,5°LS y 40°LS para el escenario RCP 2,6 y RCP 8,5 respectivamente. La suma de riego demandada por la planta en la etapa crítica (periodo entre el máximo de IAF y llenado del grano) en el presente fue en promedio de 207,04 y 221,03 mm para la variedad precoz y tardía respectivamente. Asimismo hubo una tendencia a reducirse levemente en los escenarios futuros siendo el valor mínimo el del escenario RCP 8,5 año 2070 con 186,33 mm (variedad precoz) y 203,31 mm (variedad tardía) (fila4 Figura 16 y Figura 17). Por último se evaluó la precipitación entre la maduración y la cosecha debido a los problemas que tuvo el cultivo por lluvias de temporada 2015-2016 que dificultó las labores de cosecha, sin embargo según las simulaciones la suma de precipitación es muy baja (menos del 1,5 mm) en todos los puntos de simulación evaluados.

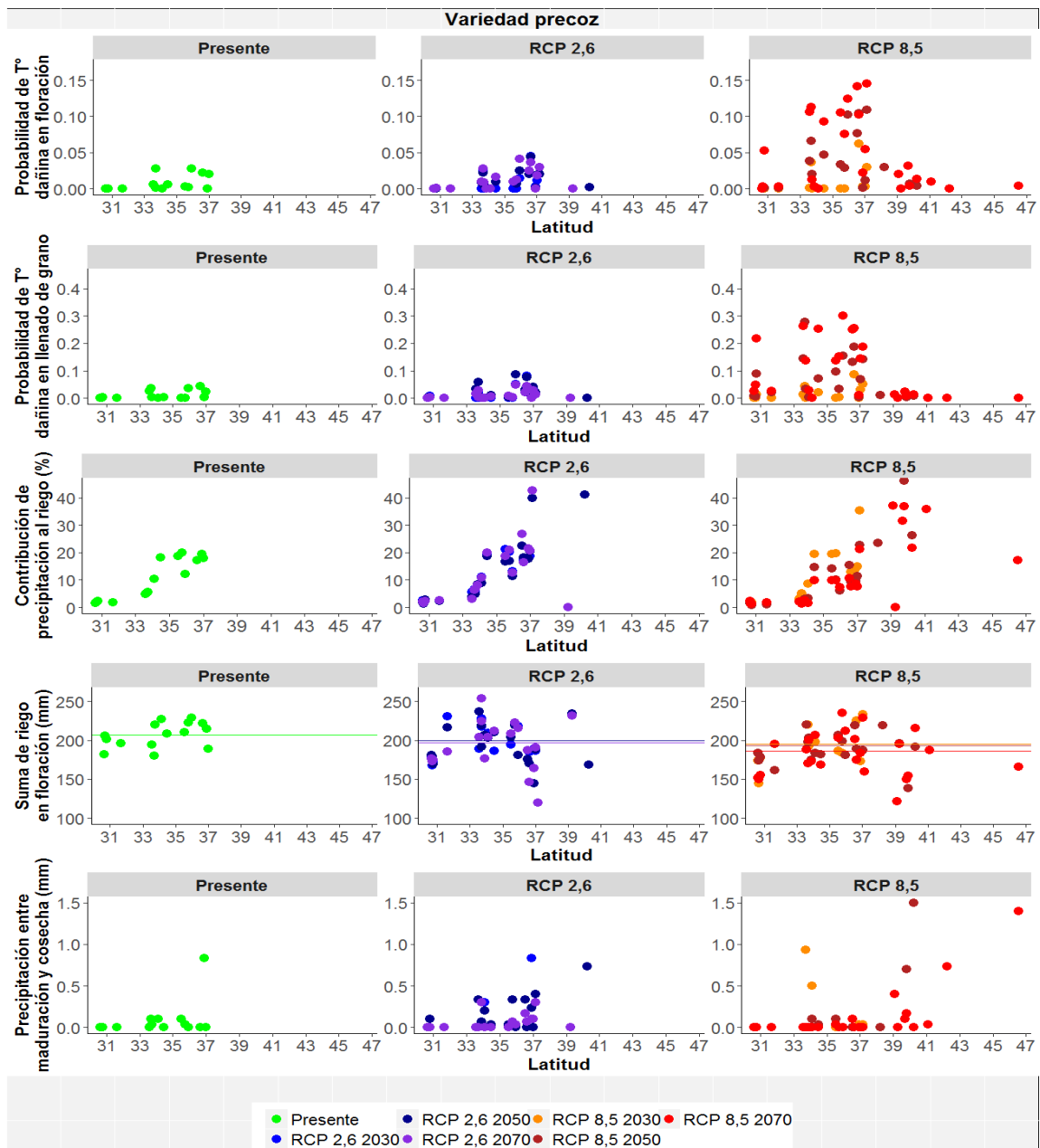


Figura 16. Indicadores de vulnerabilidad para el cultivo de maíz precoz que puede provocar problemas por reducción de la producción o en las labores de cosecha. Las líneas horizontales representan los promedios de riego demandado (mm) por el cultivo de maíz en puntos de simulación entre las regiones IV-VIII, Presente: 207,04; RCP 2,6: 196,62 (2030), 199,38 (2050), 197,02 (2070); RCP 8,5: 195,58 (2030), 192,93 (2050), 186,33 (2070).

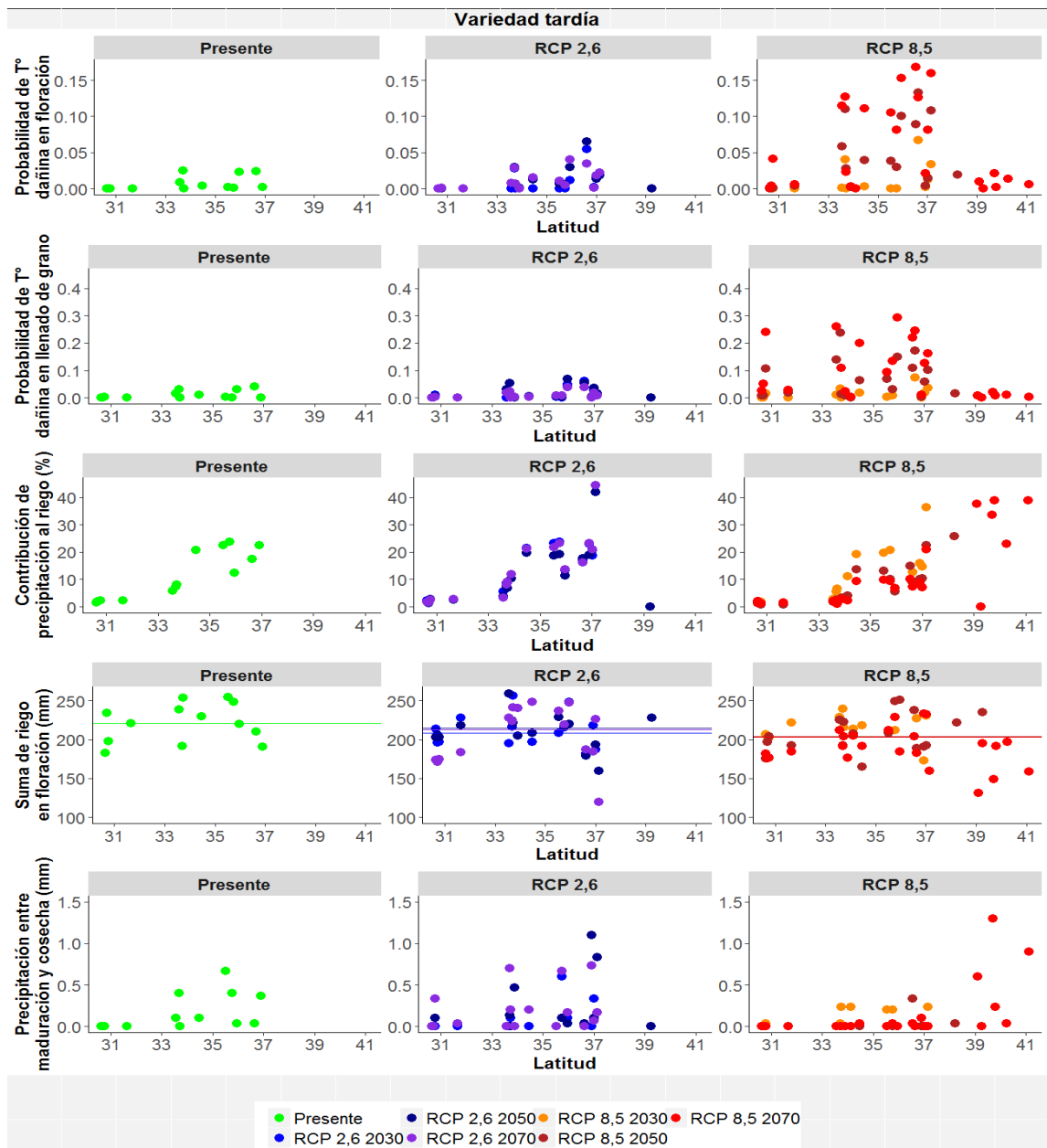


Figura 17. Indicadores de vulnerabilidad para el cultivo de maíz tardío que puede provocar problemas por reducción de la producción o en las labores de cosecha. Las líneas horizontales representan los promedios de riego demandado (mm) por el cultivo de maíz en puntos de simulación entre las regiones IV-VIII, Presente: 221,03; RCP 2,6: 208,51 (2030), 214,40 (2050), 212,51 (2070); RCP 8,5: 204,23 (2030), 203,67 (2050), 203,31 (2070).

4. Discusión

4.1. Ajuste del modelo del cultivo de maíz

Los ajustes que presentó el modelo, en términos generales, son apoyados por indicadores estadísticos en la comparación del rendimiento, lámina de riego, absorción de nitrógeno e IAF simulados, en comparación a lo observado en los ensayos, además de literatura y lo estimado por sensores remotos, respectivamente. Este trabajo muestra la conveniencia de estimar el IAF por el sensor remoto LandSat7, que fue una herramienta complementaria en la tarea de calibrar el modelo y cubrir el déficit de información inicial a una gran resolución (30x30m). Esto permitió el cálculo del IAF a nivel de predios agrícolas y en diferentes localidades del territorio chileno. A pesar de la inherente incertidumbre, la estimación del IAF en diferentes tiempos del desarrollo del cultivo permitió darle mayor realismo y aumentar la confiabilidad al modelo.

La incorporación de los sensores remotos dentro de modelos de cultivo ha sido explorada con anterioridad. El trabajo de Maas (1986), Bach (1999) y Doraiswamy *et al.* (2004) (el último a una escala análoga a la comuna) incorporan al modelo de cultivo la estimación de IAF por sensores satelitales. Aunque comúnmente dichas estimaciones de IAF son asimiladas dentro de los parámetros de modelamiento para estimar por simulación la producción del cultivo. Sin embargo nuestra investigación usa el IAF estimado por sensores remoto bajo una forma muy simplificada del método de recalibración (Delécolle, *et al.*, 1992). Usando el juicio experto para modificar los parámetros en un rango aceptable y observar que juego de ellos pueden ajustarse mejor con los datos de IAF estimados, alternativo a las automatizaciones que permitan la modificación de esos parámetros. Asimismo, uno de los aportes de nuestra investigación es que estamos usando las estimaciones por sensores remotos sin necesidad de alguna medición de terreno, tratando de reconstruir valores pasados (6 años atrás) de una incipiente base de datos, a una escala local, en un área de interés a nivel de país, de una forma gratuita y disponible para el público en general.

Los errores presentados por el modelo CropSyst al simular el IAF son comparables a los reportados en otras investigaciones realizadas con otros programas de modelamiento y cultivos (Flénet *et al.*, 2004). Sin embargo, el indicador EM y la similitud que muestra la

forma de la curva simulada a la real apoyarían la idea de que el ajuste del modelo es razonable. Si existiese mucha incertidumbre al usar el IAF estimado por sensores remotos, se podrían calcular otras variables que se han reportado poseen mejores ajustes como la biomasa estimada con índices de vegetación integrados en el tiempo (Kross *et al.*, 2015) que darían un valor más aproximado a la realidad y podrían ser tomadas en cuenta para construir modelos con déficit de información.

4.2. Establecimiento exitoso del cultivo de maíz bajo cambio climático

Los resultados sobre el establecimiento del maíz coincidieron con lo reportado por (Santibáñez *et al.*, 2008). La ampliación del rango latitudinal de éxito de establecimiento de este trabajo fue determinada hasta los 47,5°LS en un escenario de cambio climático severo (RCP 8,5-2070). Sin embargo, mostró diferentes resultados en el año en que sucedía la ampliación del rango, siendo nuestros resultados tardíos (2050-2070) con respecto a lo reportado en la bibliografía (2040) (Santibáñez *et al.*, 2008). A pesar de que usamos un escenario y GCM más severo (RCP 8,5 GFDL-CM3). La discrepancia pudo estar en la diferencia de resolución entre el generador climático de la literatura (25 km²) y el de nuestra investigación (1 km²). También a las diferencias en la duración del desarrollo del cultivo de las variedades usadas entre la literatura (no mencionadas) y nuestra investigación. Por otro lado, la variedad precoz podría adaptarse mejor en ocupar nuevos lugares para cultivar maíz que la variedad tardía.

4.3. Riesgo relacionado a la reducción del rendimiento del cultivo de maíz

La reducción en el rendimiento del maíz en la zona norte y centro de Chile fue en promedio del 5 al 15% el año 2050 y de 10 al 20% en el 2070, un poco menores a los valores reportados de 10 al 20% (Santibáñez *et al.*, 2008) y 15 al 30% (Meza *et al.*, 2008) en el 2050 y 2080 respectivamente bajo un escenario SRES A2. La fecha de siembra del 05 de octubre podría ser la más apropiada para tener pequeñas pérdidas de rendimiento, pero con un aumento de la calidad del grano. Además, la variedad tardía podría favorecer a los agricultores significando un menor riesgo de pérdidas económica por los efectos negativos del cambio climático dado en la zona norte y centro-norte de Chile. No obstante, ambas variedades (precoz y tardía) podría contrarrestar el riesgo de pérdidas económicas en la zona sur del territorio. Así también la calidad del maíz

probablemente aumentaría en la variedad precoz. Sin embargo, en la variedad tardía no existe mayor diferencia con respecto al presente.

4.4. Cambio en la calidad del cultivo de maíz

Los cambios en la calidad del maíz medido de forma indirecta como N:MST g kg⁻¹ estuvieron acorde a lo observado por Abebe *et al.* (2016) y según su investigación el contenido de N en el grano decreció en 0,14% cuando la concentración de CO₂ aumentó hasta en 550 ppm. Sin embargo, el aumento de la temperatura en 1,50°C y 3,00°C se opuso a la reducción de la concentración de N, mediada por el CO₂. La reducción fue entre 0,06-0,12%. Entonces los incrementos extremos de la temperatura representados en los escenarios RCP 8,5 2050 y 2070 de este trabajo, se relacionan a incrementos de la calidad (hasta de 4%) con respecto a toda la planta de maíz (Figura 11). En oposición a los efectos del CO₂, que aunque no significativo en el rendimiento del maíz, tiene una tendencia a reducir la concentración de N en la planta (Abebe *et al.*, 2016). Entonces en Chile se esperaría que los efectos de la temperatura sobre la calidad sean dominantes en el cultivo de maíz, que los efectos producidos por el aumento de la concentración de CO₂ bajo escenarios de cambio climáticos severos (RCP 8,5).

El cambio en la calidad del maíz (N:MST) puede ser explicado a través de las ecuaciones del modelo CropSyst. Este cambio fue producido por la incapacidad de la planta para cubrir la demanda máxima de nitrógeno de una cierta cantidad de biomasa. A pesar de ello la producción de biomasa no se ve comprometida, debido a que la absorción de N no cae por debajo de la demanda crítica. Entonces, en el contexto de cambio climático, para una cierta cantidad de N absorbido (entre la demanda máxima y la crítica) y el aumento de la concentración de CO₂ (que promueve un aumento de la biomasa) producirían una menor concentración de N en la planta. No obstante, en concentraciones de CO₂ menores a las actuales, se esperaría una menor producción de biomasa y un aumento de la concentración de N más cercana a la demanda máxima. Esto concuerda con la investigación de Ripley *et al.*, (2013) quienes reportan en la subespecie C₄ de *Alloteropsis semialata* una mayor relación N:biomasa cuando fue sometida a una menor concentración de CO₂ con respecto a lo actual y sin limitaciones de N. Esto también es reforzado por la capacidad que poseen las leguminosas de no disminuir la concentración de N: biomasa en altas concentraciones de CO₂. Porque las leguminosas pueden cubrir

la demanda de N ante los grandes aumentos de biomasa en esas condiciones, como el N disponible aumenta por el incremento de la fijación de N₂. Se añade que la aclimatación de largos periodos de CO₂ nunca sucede en leguminosas como en plantas C₃ y C₄, a menos que algún nutriente esté limitado (Rogers *et al.*, 2009). Además una de las conclusiones propuestas por Leakey *et al.* (2009) menciona que en ambientes ricos en CO₂ el aumento del uso eficiente del N para la fotosíntesis (PNUE siglas en inglés) fue dado por la promoción de la toma de CO₂ más que por concentración del N foliar, aunque inferimos que el N no está por debajo de la demanda crítica.

Por otro lado, las altas temperaturas limitarían la producción de biomasa por la alta demanda atmosférica, reduciendo la evapotranspiración. Así también la menor duración del cultivo por las altas temperaturas reduciría la producción de biomasa comparado al presente. Con menores valores de biomasa se necesitaría una menor demanda de N y entonces una mayor facilidad de incrementar la relación N: biomasa en un ambiente sin limitaciones de N. Esto concordaría con los estudios de Erda *et al.* (2005) y Abebe *et al.* (2016) en trigo y en maíz respectivamente. Ellos mencionan que existen menores descensos en la concentración de N cuando incrementa la temperatura y la concentración de CO₂ comparado con solo altas concentraciones de CO₂. También relacionado a lo postulado por Ripley *et al.*, (2013) quienes mencionan que la planta es capaz de ajustar el tamaño de la biomasa y luego la relación N:biomasa.

La propuesta en esta investigación sobre el cambio en la concentración de N suma a la explicación de dilución propuesta por Poorter *et al.*, (1997). Asimismo, nuestro enfoque incluye no solo los cambios por altas concentraciones de CO₂, sino los cambios de temperatura. Además nuestros resultados se opusieron a la teoría del menor flujo de masa del N por reducción de la transpiración bajo ambiente con incrementos de las concentraciones de CO₂ (Mcgrath and Lobell, 2013). Se añade que existe evidencia anterior que desvincula la mayor concentración de N con la transpiración en elevadas concentraciones de CO₂ y soporta la idea de que concentraciones bajas pero necesarias de N no limitan el crecimiento de la biomasa (Rudmann *et al.*, 2001).

De ser cierto esto da evidencias de la necesidad de mejorar los fertilizantes para que aporten más N disponible en el suelo y/o mejores tecnologías que permitan a la planta

absorber más N. Las nuevas variedades con capacidad de aumentar la absorción radicular máxima de N disponible del suelo no son descartadas. También variedades que tengan un rango amplio entre los valores de concentración crítica y máxima de N demandada por la biomasa, evitaría bajas en el rendimiento cuando la fertilización por nitrógeno sea escasa o ineficiente.

4.5. Vulnerabilidad del cultivo de maíz al ambiente

También es importante mencionar que el rendimiento predicho en este estudio podría verse aún más afectado por el aumento de la ocurrencia de temperaturas dañinas en un escenario extremo (RCP 8,5 años 2050 y 2070) en las fases de floración y llenado de grano del maíz sobre todo en la zona norte (IV región) y centro de Chile. Las altas temperaturas en estas fases han sido vinculadas a la absorción de granos de maíz provocado por una baja translocación de productos a la mazorca debido a una baja asimilación de biomasa producto del estrés generado por las altas temperaturas (Eyshi Rezaei *et al.*, 2015). Así también, de los datos reportados por Neiff *et al.* (2016) estimamos 54,40% (floración:-9,80%, llenado de grano:-44,60%) de reducción en el rendimiento de maíz, aunque con 30 días en un ambiente bajo altas temperaturas. Tomando en cuenta esta cifra haría inviable cultivar la variedad precoz en los 2050 y 2070 del escenario RCP 8,5, proponiendo 14000 kg ha⁻¹ como el rendimiento que cubre los costos directos. Sin embargo, la variedad tardía podría producir ganancias económicas en la parte sur-centro de Chile (36,91° LS) y hacia el sur de ésta. Por otro lado las probabilidades de temperaturas perjudiciales en la zona sur de Chile son bajas y entonces los rendimientos reportados en este trabajo no deberían ser penalizados. Como próximo paso se recomendaría la inclusión del efecto de las temperaturas extremas dentro del modelo, para cuantificar los efectos sobre el rendimiento y el riesgo asociado a ello.

Por último, la contribución de la precipitación hacia el agua de riego demandado por el cultivo, en la zona central, tanto en el escenario RCP 2,6 y RCP 8,5 fue similar a los valores observados en el presente (207-221 mm). El agua proporcionada por la lluvia con respecto a la total demanda por el cultivo aumenta en el escenario RCP 2,6 y RCP 8,5 en todos los periodos y en función al aumento de la latitud. Al sur de Chile se esperaría un ahorro sustancial (hasta del 40%) del agua de riego demandando por la el

cultivo en un escenario extremo (RCP 8,5 2070). La suma de riego en la etapa crítica de floración del maíz sería ligeramente menor y disminuiría con el aumento de la latitud en dicho escenario. Entonces las mejores condiciones para buenas producciones de maíz podrían estar en la parte sur de Chile, si se produce un escenario extremo.

5. Conclusiones

Este trabajo indica que la variedad precoz podría tener éxito de establecimiento en una mayor cantidad de zonas de Chile frente a un cambio climático extremo en comparación a la variedad tardía. Asimismo, ambas variedades se podrán establecer en áreas más cercanas a la cordillera de la zona norte. Podría existir menor pérdida de rendimiento y ganancia de calidad del maíz en la fecha de siembra del 05 de octubre. El rendimiento fue afectado por el cambio climático existiendo menor probabilidad de ganancias económicas en el escenario RCP 8,5 en los años 2050 y 2070, no obstante la calidad aumenta hasta un 4%. En el mismo escenario y años fueron menos vulnerables las áreas ubicadas en la zona centro-sur y sur de Chile. Además es probable que el cambio de la calidad pueda verse dominado por la temperatura más que por la concentración de CO₂. Por último, la probabilidad de temperaturas dañinas es alta en la parte central por lo que es posible que existan menores rendimientos a los simulados en este trabajo, no así en la zona sur con bajas probabilidades temperaturas dañinas, altas contribuciones de la lluvia al riego, buenos rendimientos y valores de N:MST (8 a 11 g kg⁻¹) similares a los de la zona central en la actualidad.

Resumen

Waldo Dávila Peralta. Análisis de los efectos del cambio climático sobre el cultivo de maíz en Chile. Tesis, *Magister* en Recursos Naturales, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 78pp. El maíz es el segundo cultivo más importante para Chile. El cambio climático podría vulnerar su rendimiento y calidad. Para analizar su vulnerabilidad, este estudio calibró un modelo de maíz en CropSyst. El modelo fue construido a partir de información de terreno reducida, información gratuita de clima y suelo, e imágenes Landsat 7 para la estimación del índice de área foliar (IAF). El modelo fue ejecutado simulando cuatro fechas de siembra, para tres escenarios de emisiones (presente, RCP 2,6 y RCP 8,5) y tres períodos de tiempo en el futuro (2030, 2050, 2070). Los cambios en el rendimiento fueron evaluados por un análisis de sensibilidad y, en la calidad del maíz, mediante la observación de la distribución de frecuencias acumuladas. También se analizó la vulnerabilidad ambiental del cultivo a altas temperaturas. La fecha de siembra del 05 de octubre fue la fecha más representativa, con un balance entre pérdidas de rendimiento y ganancias en calidad. La variedad precoz se pudo establecer con éxito en latitudes más al sur que la variedad tardía. La probabilidad de alcanzar rendimientos por encima de los costos directos fue alta en la variedad tardía aún en escenarios más dañinos (RCP 8,5 2050 y 2070). Los efectos de las altas temperaturas, no contempladas en el modelo, podrían reducir más el rendimiento simulado. La calidad del maíz tuvo una tendencia a incrementar con la temperatura, sin embargo el CO₂ produjo una tendencia a reducir la calidad del maíz.

Palabras clave: Cambio climático, maíz, CropSyst, LandSat7, rendimiento, calidad de grano.

6. Referencias bibliográficas

- Abebe, A., Pathak, H., Singh, S.D., Bhatia, A., Harit, R.C., Kumar, V., 2016. Growth, yield and quality of maize with elevated atmospheric carbon dioxide and temperature in north-west India. *Agric. Ecosyst. Environ.* 218, 66–72. doi:10.1016/j.agee.2015.11.014
- Abraha, M.G., Savage, M.J., 2006. Potential impacts of climate change on the grain yield of maize for the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 115, 150–160. doi:10.1016/j.agee.2005.12.020
- Agroclima, Sistema de red agroclima FDF-INIA-DMC on the World Wide Web. (Consulted: May 13, 2016). Available at: <http://www.agroclima.cl/>
- Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J.L., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I., Robison, C.W., 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133, 395–406. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(395)
- Bach, H., 1999. Yield estimation of corn based on multitemporal LANDSAT-TM data as input for an agrometeorological model. *Pure Appl. Opt. J. Eur. Opt. Soc. Part A* 7, 809–825. doi:10.1088/0963-9659/7/4/017
- Bastiaanssen, W., 1998. *Water Resources Management : The State of the Art*.
- Bender, R.R., Haegerle, J.W., Ruffo, M.L., Below, F.E., 2013. Transgenic corn rootworm protection enhances uptake and post-flowering mineral nutrient accumulation. *Agron. J.* 105, 1626–1634. doi:10.2134/agronj2013.0230
- Bouazzama, B., Mailhol, J.C., Xanthoulis, D., Bouaziz, A., Ruelle, P., Belhouchette, H., 2013. Silage maize growth simulation using pilote and cropsyst model. *Irrig. Drain.* 62, 84–96. doi:10.1002/ird.1715
- Ceglar, A., Chukaliev, O., Duvellier, G., Niemeyer, S., 2013. Water requirements for maize production in Europe under changing climate conditions 1–9.
- Chavez, P. a T.S., 1988. An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data *. *Remote Sens. Environ.* 479, 459–479. doi:10.1016/0034-4257(88)90019-3
- Ciampitti, I.A., Vyn, T.J., 2013. Grain nitrogen source changes over time in maize: A review. *Crop Sci.* 53, 366–377. doi:10.2135/cropsci2012.07.0439
- CIREN, 2003. *Estudio Agrológico X Región. Descripciones de Suelos y Materiales y*

Simbolos.

- CIREN, 2002. Estudio Agrológico IX Región. Descripciones de Suelos, materiales y Simbolos.
- CIREN, 1999. Estudio Agrológico VIII Región. Descripciones de suelos materiales y símbolos.
- CIREN, 1997a. Estudio Agrológico V Región. Descripción de suelos, materiales y símbolos.
- CIREN, 1997b. Estudio Agrológico VII Región. Descripciones de suelos materiales y símbolos.
- CIREN, 1996a. Estudio Agrológico Región Metropolitana. Descripciones de Suelos y Materiales y Símbolos.
- CIREN, 1996b. Estudio Agrológico VI región. Descripciones de suelos materiales y símbolos.
- Cuenca, R.H., Ciotti, S.P., Hagimoto, Y., 2013. Application of landsat to evaluate effects of irrigation forbearance. *Remote Sens.* 5, 3776–3802. doi:10.3390/rs5083776
- Delécolle, R., Maas, S.J., Guérif, M., Baret, F., 1992. Remote sensing and crop production models: present trends. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 47, 145–161. doi:10.1016/0924-2716(92)90030-D
- DGA, 2016. Análisis de la variación de caudales río las Chinas — río Serrano. Región de Magallanes y Antártica Chilena. Santiago.
- Díaz-Ambrona, C.G.H., Gigena, R., Mendoza, C.O., 2013. Climate change impacts on maize and dry bean yields of smallholder farmers in Honduras. *Iberoam. J. Dev. Stud.* 2, 4–22.
- Doraiswamy, P.C., Hatfield, J.L., Jackson, T.J., Akhmedov, B., Prueger, J., Stern, A., 2004. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. *Remote Sens. Environ.* 92, 548–559. doi:10.1016/j.rse.2004.05.017
- Erda, L., Wei, X., Hui, J., Yinlong, X., Yue, L., Liping, B., Liyong, X., 2005. Climate change impacts on crop yield and quality with CO2 fertilization in China. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 360, 2149–2154. doi:10.1098/rstb.2005.1743
- Eyshi Rezaei, E., Webber, H., Gaiser, T., Naab, J., Ewert, F., 2015. Heat stress in cereals: Mechanisms and modelling. *Eur. J. Agron.* 64, 98–113. doi:10.1016/j.eja.2014.10.003

- Faiguenbaum, H., 2003. Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile. Editorial Ograma. Santiago de Chile. 760p.
- FAO, 2013. Climate-Smart Agriculture. 2015 on the World Wide Web. (Consulted: July 13, 2015). Available at: <http://www.fao.org/docrep/018/i3325e/i3325e.pdf>
- Fernandes, E.C.M., Soliman, A., Confalonieri, R., Donatelli, M., Tubiello, F., 2012. Climate Change and Agriculture in Latin America, 2020-2050 : Projected Impacts and Response to Adaptation Strategies 2020–2050.
- Ferreira, R., Peralta, J., Sellés Van, G., 1995. Riego. in: Paratori O., Altamirano S. El cultivo de maíz, Chile, pp. 65-85.
- Flénet F., Villon, P., Ruget, F., 2004. Methodology of adaptation of the STICS model to a new crop: spring linseed (*Linum usitatissimum*, L.). *Agronomie* 24, 367–381. <https://doi.org/10.1051/agro:2004032>
- Fuenzalida, J., Rodríguez, E., Santibañez, F., 1993. Eficiencia del uso del agua y productividad de maíz: Un modelo simple para predecir evapotranspiración del cultivo. *Agro-Ciencia*. 9(2), 93-99.
- Fundación Chile, 2011. Cropcheck Chile: Manual de recomendaciones para el cultivo de maíz grano on the World Wide Web. (Consulted: May 20, 2015). Available at: http://fch.cl/wp-content/uploads/2013/06/Manualmaiz_baja.pdf
- Gurovich, L.A., Baerwald, D.E., 1980. Optimización de la eficiencia de riego para diferentes regímenes hídricos en maíz. *Cienc. e Investig. Agrar.* 7, 153–166.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, G., Jarvis, A., 2005. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas 1978, 1965–1978. doi:10.1002/joc.1276
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E., 2009. Aquacrop- The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.* 101, 448–459. doi:10.2134/agronj2008.0218s
- Huggins, D., Pan, W., Smith, J., 2010. Yield, Protein and Nitrogen Use Efficiency of Spring Wheat: Evaluating Field-Scale Performance. CSANR Res. Rep. 2010 – 001 Chp. 17. doi:CSANR Research Report 2010 - 001
- Jamieson P.D., P.J.R. and W.D.R., 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT 1 on wheat crops grown in New Zealand. *F. Crop. Res.* 27, 337–350.
- Jégo, G., Pattey, E., Bourgeois, G., Morrison, M.J., Drury, C.F., Tremblay, N., Tremblay, G., 2010. Calibration and performance evaluation of soybean and spring wheat

- cultivars using the STICS crop model in Eastern Canada. *F. Crop. Res.* 117, 183–196. doi:10.1016/j.fcr.2010.03.008
- Jin, Z.Q., Zhu, D.W., 2008. Impacts of Changes in Climate and Its Variability on Food Production in Northeast China. *Acta Agron. Sin.* 34, 1588–1597. doi:10.1016/S1875-2780(09)60005-5
- Kremer, C., Stockle, C., 2012. Assessing the transferability of transpiration-use efficiency models of biomass production. *Chilean Journal of Agricultural Research.* 72(1), 10–15. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000100002>
- Kross, A., McNairn, H., Lapen, D., Sunohara, M., Champagne, C., 2015. Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 34, 235–248. doi:10.1016/j.jag.2014.08.002
- Leakey, A.D.B., Ainsworth, E.A., Bernacchi, C.J., Rogers, A., Long, S.P., Ort, D.R., 2009. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: Six important lessons from FACE. *J. Exp. Bot.* 60, 2859–2876. doi:10.1093/jxb/erp096
- Mcgrath, J.M., Lobell, D.B., 2013. Reduction of transpiration and altered nutrient allocation contribute to nutrient decline of crops grown in elevated CO₂ concentrations. *Plant, Cell Environ.* 36, 697–705. doi:10.1111/pce.12007
- Meza, F.J., Silva, D., 2009. Dynamic adaptation of maize and wheat production to climate change. *Clim. Change* 94, 143–156. doi:10.1007/s10584-009-9544-z
- Meza, F.J., Silva, D., Vigil, H., 2008. Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agric. Syst.* 98, 21–30. doi:10.1016/j.agsy.2008.03.005
- Miao, C., Duan, Q., Sun, Q., Huang, Y., Kong, D., Yang, T., Ye, A., Di, Z., Gong, W., 2014. Assessment of CMIP5 climate models and projected temperature changes over Northern Eurasia. *Environ. Res. Lett.* 9, 55007. doi:10.1088/1748-9326/9/5/055007
- Myers, S.S., Zanobetti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A.D.B., Bloom, A.J., Carlisle, E., Dietterich, L.H., Fitzgerald, G., Hasegawa, T., Holbrook, N.M., Nelson, R.L., Ottman, M.J., Raboy, V., Sakai, H., Sartor, K.A., Schwartz, J., Seneweera, S., Tausz, M., Usui, Y., 2014. Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature* 510, 139–142. doi:10.1038/nature13179
- Neiff, N., Trachsel, S., Valentinuz, O.R., Balbi, C.N., Andrade, F.H., 2016. High

- temperatures around flowering in maize: Effects on photosynthesis and grain yield in three genotypes. *Crop Sci.* 56, 2702–2712. doi:10.2135/cropsci2015.12.0755
- Nielsen, 2013. Field Drydown of Mature Corn Grain on the World Wide Web. (Consulted: December 13, 2015). Available at: <https://www.agry.purdue.edu/ext/corn/news/timeless/graindrying.html>
- ODEPA, 2017. Costos de producción del maíz en la región de O'Higgins temporada 2016-2017 on the World Wide Web. (Consulted: July 20, 2017). Available at: <http://www.odepa.cl/costo-de-produccion-de-maiz-region-de-ohiggins/>
- ODEPA, 2013. Estudio : Cambio Climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía. <http://www.odepa.cl/cultivos-anales-superficie-produccion-y-rendimientos-4/>
- Poorter, H., Berkel, Y.V.A.N., Baxter, R., Hertog, J.D.E.N., Dijkstra, P., Gifeord, R.M., 1997. The effect of elevated CO₂ on the chemical composition and construction costs of leaves of 27 C₃ species 472–482.
- Rawal, R., Kuligod, V.B., 2014. Influence of graded doses of nitrogen on nutrient uptake and grain yield of maize (*Zea mays*) under varying levels of soil salinity. *Karnataka J. og Agric. Sci.* 27, 24–26.
- RCP Database on the World Wide Web. (Consulted: July 15, 2016). Available at: <http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb>
- Richardson, C., W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water resoureces Res.* 17, 182–190.
- Ripley, B.S., Cunniff, J., Osborne, C.P., 2013. Photosynthetic acclimation and resource use by the C₃ and C₄ subspecies of *Alloteropsis semialata* in low CO₂ atmospheres. *Glob. Chang. Biol.* 19, 900–910. doi:10.1111/gcb.12091
- Rivetti, A.R., 2006. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto , Córdoba , Argentina . I . Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. *Rev. FCA UNCuyo.* Tomo XXXVI, 25–36.
- Rogers, A., Ainsworth, E.A., Leakey, A.D.B., 2009. Will Elevated Carbon Dioxide Concentration Amplify the Benefits of Nitrogen Fixation in Legumes? *Plant Physiol.* 151, 1009–1016. doi:10.1104/pp.109.144113
- Rudmann, S.G., Milhan, P.J., Conroy, J.P., 2001. Influence of High CO₂Partial Pressure on Nitrogen Use Efficiency of the C₄Grasses *Panicum coloratum* and *Cenchrus ciliaris*. *Ann. Bot.* 88, 571–577. doi:10.1006/anbo.2001.1503
- Sánchez, B., Rasmussen, A., Porter, J.R., 2014. Temperatures and the growth and

- development of maize and rice: A review. *Glob. Chang. Biol.* 20, 408–417. doi:10.1111/gcb.12389
- Santibáñez, F., Santibáñez, P., Cabrera, R., Solís, L., Quiroz, M., Hernández, J., 2008. Capítulo I - Estudio final Impactos Productivos en el Sector Silvoagropecuario. *Cent. Agric. y Medio Ambient.* Capítulo I, 181.
- Singh, R.K., Senay, G.B., Velpuri, N.M., Bohms, S., Scott, R.L., Verdin, J.P., 2013. Actual evapotranspiration (water use) assessment of the colorado river basin at the landsat resolution using the operational simplified surface energy balance model. *Remote Sens.* 6, 233–256. doi:10.3390/rs6010233
- Stockle, C.O., Cabelguenne, M., Debaeke, P., 1997. Comparison of CropSyst performance for water management in southwestern France using submodels of different levels of complexity. *Dev. Crop Sci.* 25, 113–122. doi:10.1016/S0378-519X(97)80013-X
- Stöckle, C.O., Nelson, R., 1998. *Cropping Systems Simulation Model User 's Manual.*
- Subedi, K.D., Ma, B.L., 2005. Nitrogen uptake and partitioning in stay-green and leafy maize hybrids. *Crop Sci.* 45, 740–747. doi:10.2135/cropsci2005.0740
- Tingem, M., Rivington, M., Bellocchi, G., Azam-Ali, S., Colls, J., 2008. Effects of climate change on crop production in Cameroon. *Clim. Res.* 36, 65–77. doi:10.3354/cr00733
- Tinoco, C., Ramírez, A., Villareal, E., Ruiz, A., 2008. Arreglo espacial de híbridos de maíz, índice de área foliar y rendimiento* stand arrangement of maize hybrids, leaf area index and seed yield. *Agric. Técnica en México* 34, 271–278.
- Tubiello, F., Donatelli, M., 2000. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *Eur. J. Agron.* 13, 179–189.
- Universidad de Chile, 2012. *Consultoría para la Elaboración de un Estudio sobre Estado del Arte de Modelos para la Investigación del Calentamiento Global.*
- Van Heemst, H.D.J., 1988. Plant data values required for simple crop growth simulation models: review and bibliography. *Simul. Rep. CABO-TT.*
- Vidal, M., Ruiz, R., Antúnez, A., Araya, C., 2015. Antecedentes Nutricionales del Cultivo del, in: Antúnez, A., Vidal, B.M., Felmer, S., González, M. (Eds.), *Riego Por Pulsos En Maíz Grano.* Boletín INIA No 312. pp. 81–95.
- Yamaguchi, J., Tanaka, A., 1990. Quantitative observation on the root system of various crops growing in the field. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36, 483–493.

doi:10.1080/00380768.1990.10416917

Yu, P., Li, X., White, P.J., Li, C., 2015. A large and deep root system underlies high nitrogen-use efficiency in maize production. *PLoS One* 10, 1–17.
doi:10.1371/journal.pone.0126293

7. Anexos

7.1. Estimación de los GDD

$$\text{GDdía} = (T_{\min} + T_{\max}) / 2 - T_b$$

$$\text{Si: } (T_{\min} + T_{\max}) / 2 < T_b \text{ entonces } (T_{\min} + T_{\max}) / 2 = T_b$$

$$\text{Si: } (T_{\min} + T_{\max}) / 2 > T_{\text{cutoff}} \text{ entonces } (T_{\min} + T_{\max}) / 2 = T_{\text{cutoff}}$$

Donde, GDdía son los grados días estimados para un día y los grados días acumulados (GDA) desde la siembra hasta la madurez fisiológica. Para estimar los grados días acumulados de la siembra a la madurez fisiológica de una determinada variedad se promedió los grados días acumulados por cada variedad calculado en cada área experimental.

7.2. Variables ecofisiológicas del cultivo de maíz llevadas usados como datos de entrada del modelo

Tabla 10. Valor de los otros parámetros tomados de la literatura o tomados por defecto de CropSyst

Parámetro	Unidad	Variedades			Bibliografía
		5	6	7	
Temperatura base	°C		5,00 (CCL)		Stockle <i>et al.</i> , 1997
Temperatura de cutoff	°C		30		Hsiao <i>et al.</i> , 2009
Radiación usada efectivamente	g MJ ⁻¹		3,50 (C)		-
Máxima profundidad de la raíz	m		1,50 (C)		-
Proporción (peso) raíz/tallo en la emergencia	Adim(*)		2,00		Van Heemst, 1988
Proporción (peso) raíz/tallo en el desarrollo final	Adim		0,10 (CCL)		Yu <i>et al.</i> , 2015
Máxima densidad de raíz en longitud para el desarrollo total de la raíz	cm cm ⁻³		5,00 (CCL)		Yamaguchi and Tanaka, 1990
Máxima toma de agua por la planta	mm día ⁻¹		12,00		Fernandes <i>et al.</i> , 2012
Fracción de IAF máximo en la madurez fisiológica	Adim		0,67 (C)		-
Coefficiente de partición de tallo/Hoja	Adim		1,90 (C)		-
Coefficiente de evapotranspiración del cultivo con el máximo dosel	Adim		1,10		Fernandes <i>et al.</i> , 2012

Uso eficiente de la transpiración cuando el déficit de vapor hídrico es un 1KPa	g BS kgH ₂ O ⁻¹	6,10(C)	6,37(L)	6,37 (L)	Fuenzalida, 1993
Coeficiente de escala para el ajuste de la curva de uso eficiente de transpiración	Adim		0,42		Kremer y Stockel, 2012
Potencial hídrico de la hoja al inicio de la clausura de los estomas	J kg ⁻¹		-1200,00		Stockle y Nelson, 1998
Potencial hídrico en la hoja para llegar a la marchitez	J kg ⁻¹		-1500,00		Stockle y Nelson, 1998
Potencial hídrico en la hoja que inicia la reducción de la expansión del dosel	J kg ⁻¹		-900,00 (C)		-
Potencial hídrico en la hoja que para la expansión del dosel	J kg ⁻¹		-1025,00 (C)		-
Coeficiente de extinción solar para la radiación	Adim		0,60		Tinoco <i>et al.</i> , 2008
Índice de cosecha sin estrés	Adim		0,48		Hsiao <i>et al.</i> , 2009

(*) Adim: Adimensional

(C) Calibrado

(CCL) Calibrado con un valor cercano a la literatura

(E) Estimado

7.3. Ecuaciones usadas para calcular la reflectancia a partir de imágenes satelitales LAndSat7

Los valores de ND corregidos de la imagen fueron llevados a radianza (L) en W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹ con la siguiente fórmula:

$$L = ((L_{max} - L_{min}) \times (ND - Q_{min})) / (Q_{max} - Q_{min}) + L_{min}$$

Donde L_{max} es la radianza máxima ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$) correspondiente al valor máximo de ND (número digital) y L_{min} la radianza mínima ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$) correspondiente al mínimo valor de ND , ND es el valor de ND del pixel, Q_{max} es el valor máximo de ND de la imagen y Q_{min} es el valor mínimo de ND de la imagen. Los valores de radianza fueron llevados a reflectancia planetaria en el tope de la atmósfera (ρ) (adimensional) con la siguiente fórmula.

$$\rho = (\pi * L) / (ESUN_{\lambda} * \cos\theta * dr)$$

Donde dr es la distancia de la tierra al sol (adimensional), $ESUN_{\lambda}$ es radiación solar extraterrestre promedio para una cierta longitud de onda y θ es el ángulo cenital en grados sexagesimales.

Ecuación del promedio ponderado de IAF en un predio según la siguiente ecuación:

$$PP = \sum_{i=1}^n \left(\frac{COB_{maíz-pixel} * IAF_{pixel}}{A_{total}} \right)$$

Donde PP es el promedio ponderado de IAF para todas las variedades ubicadas en un predio. El $COB_{maíz-pixel}$ es la fracción de la cobertura de maíz en el pixel "i", el IAF_{pixel} es el valor de índice de área foliar en el pixel "i". Por último, A_{total} es el área total registrada en la base de datos para todas las variedades en un predio.

7.4. Indicadores estadísticos usados en la investigación

El coeficiente de eficiencia del modelo es calculado como:

$$EM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{prom})^2}$$

Raíz del cuadrado del error medio relativo fue calculado como:

$$\%PEA = \frac{|Y_{est} - Y_{obs}|}{Y_{prom}}$$

Raíz del cuadrado del error medio relativo fue calculado como:

$$RRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_{est} - Y_{obs})^2} \times \frac{100}{Y_{prom}}$$

Donde: Y_{est} son los valores simulados, Y_{obs} son los valores observados por último Y_{prom} es el valor promedio de Y_{obs} .

7.5. Modelos de regresión usados para construir el generador climático

Tabla 11. Modelos de regresión estimados para el generador de clima.

Variable	Modelo	R ² ajustado (11)	Significancia
SumPP ⁽¹⁾	-	-	-
μTx ⁽²⁾	-	-	-
μTn ⁽³⁾	-	-	-
P01 ⁽⁴⁾	$Y=0,2308+0,7423(A)+3,7317(B)$ $A=0,0026(\text{SumPP}+1)+1,0928$ $B=(\mu\text{Tx}^{-0,38})0,4456$ P01=Y-1 Si $P01 > 1 \Rightarrow P01=1$ Si: $\text{SumPP} < 4 \Rightarrow P01=0,000634$	0,73	A: $p < 3,16 \times 10^{-68}$ B: $p < 4,24 \times 10^{-28}$
P11 ⁽⁵⁾	$Y=0,49958+0,7967(A) -0,00995(\mu\text{Tx})$ $A=0,1368\text{Ln}(\text{SumPP}+1)+1,0694$ P11=Y-1 Si: $\text{SumPP} < 0,1 \Rightarrow P11=0,0$	0,74	A: $p < 3,35 \times 10^{-69}$ μTx : $p < 3,10 \times 10^{-12}$
μPP	$Y=0,879+0,055(A)+ 0,006(\mu\text{Tx})-0,002(\mu\text{Tn})$ $A= \text{Ln}(\text{SumPP}+1)$ μPP= Y^{0,1}	0,83	A: $p < 3,25 \times 10^{-176}$ μTx : $p < 1,37 \times 10^{-39}$ μTn : $p < 0,01$

	Si: $\mu_{PP} < 0 \Rightarrow \mu_{PP} = 0,04$		
SPP ⁽⁶⁾	$Y = 1,1674(A)$ $A = \ln(\mu_{PP} + 1)$ SPP = exp(Y) - 1	0,79	A: $p < 9,08 \times 10^{-170}$
STx	STx = Y = -1,2664 + 0,8907(A + B) $A = -0,23 \ln(\text{SumPP} + 1)^2 + 1,34 \ln(\text{SumPP} + 1) + 1,86$ $B = 0,51(-0,02(\mu_{Tx} - \mu_{Tn})^2) + 0,44(\mu_{Tx} - \mu_{Tn}) + 0,17$	0,49	A: $p < 1,22 \times 10^{-58}$ B: $p < 1,36 \times 10^{-10}$
STn	STn = Y = 2,81 + 0,16(A) - 0,09\mu_{Tn} $A = \ln(\text{SumPP} + 1)$	0,46	A: $p < 1,89 \times 10^{-19}$ B: $p < 8,34 \times 10^{-23}$
\mu logit(HR) ⁽⁷⁾	\mu logit(HR) = Y = 0,362 + 0,346(A) - 0,023(\mu_{Tx}) $A = \ln(\text{SumPP} + 2)$	0,57	A: $p < 9,06 \times 10^{-41}$ μ_{Tx} : $p < 1,00 \times 10^{-5}$
Slogit(HR)	$Y = 0,582 + 0,072(A) + 0,011(\mu_{Tn})^{-1}$ $A = (\text{SumPP} + 1)^{-1}$ Slogit(HR) = Y - 1	0,51	A: $p < 2,28 \times 10^{-16}$ Slogit(HR): $p < 3,41 \times 10^{-41}$
\mu logit(Rg/RA) ⁽⁸⁾	\mu logit(Rg/RA) = Y = -0,792 - 0,077(A) + 0,0154(\mu_{Tx})	0,51	A: $p < 5,17 \times 10^{-15}$ μ_{Tx} : $p < 3,55 \times 10^{-15}$

	A=Ln(SumPP+2)		
	Si: SumPP<1=> $\mu\text{logit(Rg/RA)} = -0,745$		
Slogit(Rg/RA)	Y=0,331+0,027(A)-0,009(μTn) A= Ln(SumPP+1) Slogit(Rg/RA)=exp (Y)-1 Si: SumPP<1=> Slogit(Rg/RA)=0,416	0,27	A: $p < 4,75 \times 10^{-13}$ μTx : $p < 1,81 \times 10^{-8}$
rTx.Tn ⁽⁹⁾	rTx.Tn=Y=-0,685(A)-0,369(rTx.logit(Rg/RA))+0,509 A= (rTx.logit(Rg/RA)) ²	0,47	A: $p < 7,48 \times 10^{-12}$ μTx : $p < 1,26 \times 10^{-8}$
rTx.logitHR	rTx.logitHR=Y=-0,146-0,012(μTx)+0,068(rTx.Tn)-0,335(rTx.logit(Rg/RA))	0,42	μTx : $p < 3,29 \times 10^{-20}$ rTx.Tn: $p < 0,03$ rTx.logit(Rg/RA): $p < 3,22 \times 10^{-19}$
rTx.logit(Rg/RA)	rTx.logit(Rg/RA)=Y=-0,1477+0,519(A)+0,8366(B) A=-0,004($\mu\text{Tx} - \mu\text{Tn}$) ² + 0,129($\mu\text{Tx} - \mu\text{Tn}$)-0,443 B=-0,043STx ² + 0,43STx - 0,46	0,41	A: $p < 4,93 \times 10^{-10}$ B: $p < 4,42 \times 10^{-38}$
rTn.logit(HR)	rTn.logit(HR)=Y=-2.489+2.558(A)+0.576(rTx.Tn)-0.288(rTx.logit(Rg/RA)) A=-0.0004(lat) ² -0.0307(lat)+0.0152-0.000006*(DM) ² +0.0009(DM)+ 0.5112	0,27	A: $p < 1,23 \times 10^{-37}$

	DM: Distancia al mar lat: Latitud		
rTn.logit(Rg/RA)	rTn.logit(Rg/RA)=Y=-2,34+4,51(A)+0,37(rTx.Tn)-0,13(rTx.logitHR)-0,09(rTn.logit(HR)) A=0,0000006(SumPP ²)-0,0004(SumPP)+0,4366	0,52	A: p<9,1 x 10 ⁻³² rTx.Tn: p<1,03 x 10 ⁻²⁹ rTx.logitHR: p<1,94 x 10 ⁻⁴ rTn.logit(HR): p<3,65 x 10 ⁻³
rlogit(HR).logit(Rg/RA)	rlogit(RH).logit(Rg/RA)=Y= 3,34+0,047(Long)-0,358(rTx.Tn)-0,766(rTx.logit(Rg/RA))-0,317(rTn.logit(HR))+0,084(rTn.logit(Rg/RA))	0,70	long: p<1,96 x 10 ⁻¹⁵ rTx.Tn: p<4.04 x 10 ⁻²² rTx.logit(Rg/RA): p<2,94 x 10 ⁻⁸⁹ rTn.logit(HR): p<1,18 x 10 ⁻²⁴ rTn.logit(Rg/RA): p<0,03
r(Tx+1).logit(HR) ⁽¹⁰⁾	r(Tx+1).logit(HR)=Y=0,0004(SumPP)-0,0024(μTx)+0,616(rTx.logitHR)	0,67	SumPP: p<2,32 x 10 ⁻²² μTx: p<0,03 rTx.logit(HR): p<8,22 x 10 ⁻⁸⁵
r(Tx+1).Tn	r(Tx+1).Tn =Y=0,05+0,62(rTx.Tn)-0,05(A) A=rTx.logit(Rg/RA) ² + rTx.logit(Rg/RA)	0,80	A: p<1,58 x 10 ⁻¹²⁵ rTx.Tn: p<3,36 x 10 ⁻⁴
r(Tx+1).Tx	r(Tx+1).Tx=Y= 0,27+0,19(r(Tx+1).Tn)-0,3(r(Tx+1).logit(HR))+0,15(r(Tn+1).Tx)+0,17(r(logit(HR). logit(HR))	0,45	r(Tx+1).Tn: p<1,96 x 10 ⁻¹⁵ rTx.Tn: p<4.04 x 10 ⁻²² r(Tx+1).logit(HR): p<2,94 x 10 ⁻⁸⁹ r(Tn+1).Tx: p<1,18 x 10 ⁻²⁴ r(logit(HR). logit(HR)): p<1,07 x 10 ⁻⁸
r(Tx+1).logit(Rg/RA)	r(Tx+1).logit(Rg/RA)=Y=-0,32+0.17(A)+0,62(rTx.logit(Rg/RA)) A= Ln(Stx+1)	0,67	A: p<3,55 x 10 ⁻⁹ rTx.logit(Rg/RA): p<3,44 x 10 ⁻⁸¹

r(Tn+1).Tx	r(Tn+1).Tx =Y= 0,7071(rTx.Tn)+ 0,1373	0,70	rTx.Tn: p<3,27 x 10 ⁻¹⁴⁴
r(Tn+1).Tn	r(Tn+1).Tn=Y= 0,36+0,07(μ logit(Rg/RA))+0,2(Slogit(Rg/RA))+0,1(rTx.logit(Rg/RA))-0,1(r(Tx+1).logit(Rg/RA))-0,1(r(Tn+1).logit(Rg/RA))-0,29(r(logit(Rg/RA)+1).Tn)+0,21(A) A=r(Tx+1).Tn) ² + r(Tx+1).Tn	0,41	A: p<7,27 x 10 ⁻¹⁸ μ logit(Rg/RA): p<0,03 Slogit(Rg/RA): p<2,17 x 10 ⁻⁶ rTx.logit(Rg/RA): p<2,65 x 10 ⁻³ r(Tx+1).logit(Rg/RA): p<9,89 x 10 ⁻³ r(Tn+1).logit(Rg/RA): p<6,76 x 10 ⁻³ r(logit(Rg/RA)+1).Tn: p<1,75 x 10 ⁻¹³
r(Tn+1).logit(HR)	r(Tn+1).logit(HR)=Y= 0,02(μ logit(HR))-0,1(rTx.Tn)+0,59(rTn.logit(HR))-0,12(rTn.logit(Rg/RA))	0,73	μ logit(HR): p<6,11 x 10 ⁻³ rTx.Tn: p<1,40 x 10 ⁻⁵ rTn.logit(HR): p<5,39 x 10 ⁻⁷⁹ rTn.logit(Rg/RA) : p<1,87 x 10 ⁻³
r(Tn+1).logit(Rg/RA)	r(Tn+1).logit(Rg/RA)=Y= 0,0528+0,0765(Cos)-0,0005(SumPP)+0,0315(μ logit(HR))+0,7598(rTn.logit(Rg/RA)) Cos: cos(2 π *(N° de mes)/12)	0,74	Cos: p<1,01 x 10 ⁻²³ SumPP: p<2,49 x 10 ⁻⁷ μ logit(HR): p<5,65 x 10 ⁻⁵ rTn.logit(Rg/RA): p<3,14 x 10 ⁻¹⁰²
r(logit(HR)+1).Tx	r(Tn+1).logit(Rg/RA)=Y= -0,129(STx) ¹ +0,016(A)+0,643(rTx.logitHR) A= μ logit(HR) ² + μ logit(HR)	0,54	A: p<1,01 x 10 ⁻²³ STx: p<2,49 x 10 ⁻⁷ rTx.logitHR: p<5,65 x 10 ⁻⁵

r(logit(HR)+1).Tn	r(logit(HR)+1).Tx =Y= 0,21(A)+0,61(rTn.logit(HR)) A=-0,00002(DM) ² +0,0038(DM)	0,69	A: p<3,17 x 10 ⁻³ rTn.logitHR: p<1,23 x 10 ⁻¹²¹
r(logit(HR)+1).logit(Rg/RA)	r(logit(HR)+1).logit(Rg/RA)=Y= - 0,02(STx)+0,28(rTx.logit(Rg/RA))+0,45(rHR.logit(Rg/RA))-0,37(r(Tx+1).logit(Rg/RA))-0,13(r(logit(HR)+1).Tn)	0,59	STx: p<4,30 x 10 ⁻³ rTx.logit(Rg/RA): p<1,02 x 10 ⁻¹³ rHR.logit(Rg/RA): p<3,19 x 10 ⁻⁴³ r(Tx+1).logit(Rg/RA): p<1,67 x 10 ⁻¹⁹ r(logit(HR)+1).Tn: p<3,35 x 10 ⁻⁷
r(logit(HR)+1).logit(HR)	r(logit(HR)+1).logit(HR)=Y= 0,504-0,085(μlogit(HR))-0,344(r(logit(HR)+1).Tx)	0,44	μlogit(HR): p<8,29 x 10 ⁻³¹ r(logit(HR)+1).Tx: p<6,54 x 10 ⁻²³
r(logit(Rg/RA)+1). Tx	r(logit(Rg/RA)+1). Tx =Y= 0,09(μlogit(Rg/RA))+0,17(rTx.Tn)+0,25(rTx.logitHR)+0,49(rTx.logit(Rg/RA))+0,13(rTx.logit(Rg/RA))+0,2(r(Tx+1).Tn)+0,26(r(Tx+1).logit(Rg/RA))-0,37(r(Tn+1).Tx)-0,46(r(Tn+1).logit(HR))	0,73	μlogit(Rg/RA): p<4,19 x 10 ⁻⁸ rTx.Tn: p<1,00 x 10 ⁻³ rTx.logitHR: p<1,51 x 10 ⁻⁹ rTx.logit(Rg/RA): p<1,59 x 10 ⁻²⁷ rTx.logit(Rg/RA): p<9,64 x 10 ⁻⁷ r(Tx+1).Tn: p<1,21 x 10 ⁻⁴ r(Tx+1).logit(Rg/RA): p<2,30 x 10 ⁻⁹ r(Tn+1).Tx: p<3,52 x 10 ⁻¹⁸ r(Tn+1). logit(HR): 7,57 x 10 ⁻²⁷

r(logit(Rg/RA)+1). Tn	r(logit(Rg/RA)+1).Tn =Y= 0,041+0,562(rTn.logit(Rg/RA))- 0,145(r(Tn+1).logit(HR))-0,165(r(logit(HR)+1).Tn)	0,57	rTn.logit(Rg/RA): p<8,87 x 10 ⁻⁷⁶ r(Tn+1). logit(HR): p<8,83 x 10 ⁻⁹ r(logit(HR)+1).Tn: p<2,80 x 10 ⁻¹⁰
r(logit(Rg/RA)+1). logit(HR)	r(logit(Rg/RA)+1).logit(HR)=Y= - 0,068(μlogit(Rg/RA))+0,08(rTx.Tn)+0,099(rTx.logit HR)+ 0,403(rlogit(HR).logit(Rg/RA))	0,49	μlogit(Rg/RA): p<5,08 x 10 ⁻⁴ rTx.Tn: p<3,36 x 10 ⁻⁴ rTx.logitHR: p<6,45 x 10 ⁻⁴ rlogit(HR).logit(Rg/RA): p<1,12 x 10 ⁻⁴⁸
r(logit(Rg/RA)+1). logit(Rg/RA)	r(logit(Rg/RA)+1).logit(Rg/RA)=Y= 0,22- 0,06(μlogit(HR))+0,24(rlogit(HR).logit(Rg/RA))+ 0,21(r(Tx+1).Tx)+0,33(r(logit(HR)+1).logit(HR))	0,41	μlogit(HR): p<6,70 x 10 ⁻⁹ rlogit(HR).logit(Rg/RA): p<1,15 x 10 ⁻¹² r(Tx+1).Tx: p<6,99 x 10 ⁻⁴ r(logit(HR)+1).logit(HR): p<1,97 x 10 ⁻⁹

(1) SumPP: Suma de precipitación (PP) en mm

(2) Tx: temperatura máxima (Tx) en °C. "μ" significa promedio donde se le observe.

(3) Tn: Temperatura mínima en °C

(4) P01: Probabilidad de que llueva el día de hoy si es que no llovió ayer

(5) P11: Probabilidad de que llueva el día de hoy si es que llovió ayer

(6) "S" significa desviación estándar muestral donde se le observe.

(7) HR: Humedad relativa. "Logit" significa que la variable ha sido llevada a dicha transformación donde se le observe.

(8) Rg/RA: Razón de la radiación global y la radiación Angot.

(9) "r" significa correlación donde se le observe

(10) "X+1" significa que es el valor del día siguiente de la variable X.

(11) El valor de R² ajustado corresponde al modelo "Y", mostrado en la segunda columna.

