

Impacto del cambio climático sobre la enfermedad roya marrón de la caña de azúcar de Argentina

Cristina del C. Morales^{*}, Emília Hamada^{**}, Horacio L. Madariaga^{***}, Alejandro M. Rago^{****}

^{*}Ingeniera en Sistemas, Magister en Gestión Ambiental. EEA Famaillá, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Tucumán, Argentina. E-mail: morales.cristina@inta.gob.ar

^{**}Ingeniera Agrícola, investigadora de Embrapa Medio Ambiente. Jaguariúna, San Pablo, Brasil, E-mail: emilia.hamada@embrapa.br

^{***}Ingeniero Electrónico, Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio de medio ambiente. Tucumán, Argentina. CONICET, Universidad Nacional de Tucumán, E-mail: madariagah@gmail.com

^{****}Ingeniero Agrónomo, Magister en Agronomía, investigador del Centro de Investigaciones Agropecuarias de Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Córdoba, Argentina, E-mail: rago.alejandro@inta.gob.ar

Received 8 October 2021; accepted 12 January 2022

Resúmen

Los fitopatógenos y las plagas están entre los primeros indicadores de los efectos del cambio climático por sus características poblacionales y de crecimiento. La roya marrón (*Puccinia melanocephala*) es una enfermedad de caña de azúcar ampliamente distribuida a nivel mundial. El objetivo de este trabajo fue evaluar la distribución espacio-temporal de la presencia de la roya marrón de la caña de azúcar en las principales áreas productoras (Tucumán, Salta y Jujuy) de Argentina, como consecuencia del cambio climático. Para ello, se utilizaron dos escenarios climáticos futuros [A2 (pesimista) y B1 (optimista)], proyectados por el IPCC. Mapas de distribución de condiciones favorables para la enfermedad fueron construidos con SIG, mediante reglas utilizando criterios de lógica matemática en base a rangos de temperatura promedio mensual (de 16°C a 30°C) y de duración del período de mojado foliar (> 4h/días) - condiciones favorables para la infección del patógeno. Fueron analizados tres períodos (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) en comparación con el período de referencia (1961-1990), con la incidencia real de la enfermedad reportada por fitopatólogos. En el período de referencia las condiciones más favorables para *P. melanocephala* ocurrieron en marzo, abril y mayo. En el escenario A2, las condiciones más favorables ocurrieron en abril y mayo para 2011-2040 y en mayo para 2071-2100; mientras para B1, fueran en abril y mayo en ambos períodos. Esta aproximación permitió determinar un leve corrimiento de las condiciones favorables para la infección del patógeno, escapando así al período de mayor susceptibilidad del cultivo, dado entre febrero y marzo.

Palabras clave: IPCC, SIG, *Puccinia melanocephala*.

Impacto das mudanças climáticas sobre a doença ferrugem marrom da cana-de-açúcar na Argentina

Resumo

Os fitopatógenos e as pragas estão entre os primeiros indicadores dos efeitos das mudanças climáticas por suas características populacionais e de crescimento. A ferrugem marrom (*Puccinia melanocephala*) é uma doença da cana-de-açúcar amplamente distribuída em nível mundial. O objetivo deste estudo foi avaliar a distribuição espaço-temporal da ferrugem marrom da cana-de-açúcar nas principais áreas produtoras (Tucumán, Salta e Jujuy) da Argentina, como consequência das mudanças climáticas. Para tanto, foram adotados os cenários climáticos futuros [A2 (pessimista) e B1 (otimista)], projetados pelo IPCC. Mapas de distribuição das condições favoráveis para a doença foram elaborados com SIG, mediante regras utilizando critérios de lógica matemática com base em faixas de temperatura média mensal (de 16°C a 30°C) e de duração do período de molhamento foliar (> 4h/dias) - condições favoráveis para a infecção do patógeno. Foram analisados três períodos (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100) em comparação com o período de referência (1961-1990), com a incidência efetiva da doença reportada por fitopatologistas. No período de referência, as condições mais favoráveis para *P. melanocephala* ocorreram em março, abril e maio. No cenário A2, as condições mais favoráveis ocorreram em abril e maio para 2011-2040 e em maio para 2071-2100; enquanto para B1, foram em abril e maio em ambos os períodos. Esta avaliação permitiu determinar uma leve mudança das condições favoráveis para a infecção do patógeno, escapando assim do período de maior susceptibilidade do cultivo, que ocorre entre fevereiro e março.

Palavras-chave: IPCC, SIG, *Puccinia melanocephala*.

1. Introducción

La roya marrón de la caña de azúcar es una enfermedad que afecta el sistema foliar de la planta y es producida por el hongo *Puccinia melanocephala* H. & P. Sydow. Las pérdidas ocasionadas por la enfermedad varían del 10% al 50% según condiciones y susceptibilidad de los cultivos (Hoy y Hollier, 2009). En Cuba y México se registraron pérdidas de hasta 50% en producción de azúcar en 1980/81. En Brasil, en cambio, fue reportada en 1986 (COPERSUCAR, 1986), verificándose pérdidas de hasta 47% en la producción (Sanguino y Cardoso, 1989), mientras que para variedades susceptibles, Matsuoka (1993) estimó que las pérdidas superaron el 60% cuando las condiciones fueron favorables a la enfermedad y hasta del 25% en variedades con resistencia intermedia a moderada. La última epifitía por roya marrón se registró en EE.UU. en 2000, sobre la variedad LCP 85-384 cuando ocupaba más del 70% del área cultivada del estado de Louisiana, variedad que hasta entonces había sido considerada resistente, donde llegó a cultivarse hasta el 90% del área de producción (Hoy y Savario, 2007), generando pérdidas de más del 20% en producción.

La roya marrón de la caña de azúcar es producida por *Puccinia melanocephala*, este patógeno es altamente infeccioso por su capacidad de diseminarse fácilmente, produciendo varias generaciones en un ciclo del cultivo y liberando esporas al medio a los 10 - 14 días a partir de cada sitio de infección durante la estación de crecimiento del cultivo. Se manifiesta principalmente en cañaverales entre los dos y seis meses de desarrollo, aunque cuando las variedades son susceptibles es posible observar síntomas durante todo el desarrollo del cultivo. La temperatura óptima de germinación de las esporas es de 19°C a 21°C, necesitando como mínimo cuatro horas de mojado en la superficie foliar, alta humedad relativa y niveles altos de fertilidad edáfica. La fertilidad de los suelos, el manejo agronómico impuesto en cada lote y las condiciones ambientales determinan la distribución y severidad de la roya marrón en los diferentes lotes. El viento es el principal agente dispersor del patógeno y las condiciones ambientales conducentes para el desarrollo de esta patología son temperaturas de 22°C a 25°C, alta humedad relativa y niveles altos de fertilidad edáfica. La fertilidad de los suelos, el manejo agronómico impuesto en cada lote y las condiciones ambientales determinan la distribución y severidad de la roya marrón en los diferentes lotes. Al ser un patógeno biotrófico, sobreviven infectando tejido verde de caña de azúcar (Rago et al., 2012).

Esta enfermedad perjudica básicamente el follaje, debido a que el desarrollo de las pústulas (síntoma típico) causan pérdida del área foliar, y

consecuentemente, una reducción de la capacidad fotosintética de la planta afectada. Infecciones severas de roya marrón han provocado pérdidas entre 10% y 50%, atribuidas a disminuciones en el número y biomasa de tallos (Hoy y Hollier, 2009). Uno de los factores que afectan la relación huésped/patógeno, es la extensión del área que ocupa la variedad resistente, ya que crea una presión de selección sobre la población del patógeno (Rago et al., 2012), por consiguiente, es importante una apropiada diversificación varietal de los cañaverales. En la década del 70 la detección de la roya en el continente americano causó cuantiosas pérdidas, especialmente en Cuba y Venezuela (Chinea et al., 2000).

El control de esta enfermedad se lleva a cabo mediante la obtención y cultivo de variedades resistentes, aunque la durabilidad de la resistencia es incierta, ya que el patógeno tiene la capacidad de adaptarse y superar la resistencia de la planta hospedera. Uno de los factores que afectan a esta relación huésped/patógeno es la extensión del área que ocupa una variedad resistente, ya que puede crear una presión de selección sobre la población del patógeno y dar lugar a una aparición más rápida de una variante genética capaz de infectar con éxito el cultivar resistente. Esta situación desencadenó la epifitía de la enfermedad sobre LCP 85-384, en EE. UU, que había sido liberada al cultivo comercial como un cultivar resistente (Hoy y Savario, 2007). Son consideradas significativas también las pérdidas indirectas por la roya marrón cuando afecta a los Programas de Mejoramiento Genético, al ser eliminados clones de buenas características agronómicas, pero con alta susceptibilidad a la enfermedad (Raid y Comstock, 2000; Rago, 2005; Tokeshi y Rago, 2005). Un punto fundamental dentro de las estrategias de manejo para este patógeno es conocer el comportamiento de los materiales disponibles. Los híbridos con algún grado de resistencia genética muestran menor cantidad y tamaño de lesiones, mayor período de latencia, menor esporulación y/o las lesiones necróticas rodeadas por un halo clorótico donde la esporulación es baja o nula. El monocultivo favorece la aparición de estos patógenos. La rotación de cultivos, materiales tolerantes, fecha de siembras tempranas, eliminación de malezas dentro del cultivo, tratamiento a la semilla y nutrición balanceada con contenidos de potasio nos ayudan a disminuir la afectación de esta enfermedad en campo. La aplicación de fungicidas preventivos apoya el manejo de la enfermedad.

Los modelos climáticos globales son la mejor herramienta para diseñar escenarios de cambio climático probables para el futuro, los mismos explican cuantitativamente el comportamiento de los componentes del clima (atmósfera, océanos, criósfera, vegetación, suelos, etc.) y sus

interacciones, lo que le permite simular escenarios de evolución climática probable para varios escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2005).

La ocurrencia de esta enfermedad está estrechamente relacionada con las condiciones ambientales favorables para las etapas del ciclo de infección del patógeno y la presencia de cultivares susceptibles. Dada la importancia de los elementos climáticos en la ocurrencia del ciclo de infección, se sabe que los cambios en el patrón de lluvias y los aumentos en la temperatura del aire pueden provocar cambios en la distribución geográfica y temporal de las enfermedades (Nazir et al., 2018). Comprender cómo estos cambios podrían afectar las epidemias de enfermedades de las plantas se ha convertido en un desafío para la investigación agronómica, ya que las pérdidas de rendimiento afectan directamente la seguridad alimentaria (IPCC, 2019).

Así el objetivo de este trabajo fue evaluar la distribución espacio-temporal de la presencia de la roya marrón de la caña de azúcar en las principales áreas productoras (Tucumán, Salta y Jujuy) de Argentina, como consecuencia del cambio climático.

2. Materiales y métodos

Para realizar este estudio, se utilizaron datos de promedios mensuales de temperatura media y duración del período de mojado foliar. Se extrajeron datos del CRU (Climate Research Unit), se consideró el clima del período 1961-1990, conforme a New et

al. (1999), que corresponde a la normal climatológica oficial de la Organización Meteorológica Mundial.

Se trabajó con tres períodos de tiempo, denominados: 2020 (período comprendido entre 2011 y 2040), 2050 (2041 y 2070) y 2080 (2071 y 2100) para los escenarios A2 y B1. El escenario A2 es un escenario pesimista, ya que asume elevadas emisiones de gases de efecto invernadero, en cambio, el escenario B1 es un escenario de menores emisiones, con características más optimistas que el escenario A2 (IPCC, 2000). Se utilizaron estos dos escenarios para poder contrastar la proyección de distribución de las condiciones predisponentes del patógeno en estas dos situaciones contrapuestas. Para las variables climáticas se trabajó con la media aritmética de las proyecciones de 20 modelos climáticos globales del IPCC, utilizando un método presentado por Hamada et al. (2008).

El área de estudio para Argentina comprendió las provincias de Tucumán, Jujuy y Salta, que representaron el 73%, 16,8% y 9,3%, respectivamente, de la superficie plantada de caña de azúcar (376,223 ha) en 2018 (Benedetti, 2018). Los departamentos considerados fueron: Ledesma, Santa Bárbara, San Pedro, El Carmen, Palpalá y San Antonio para Jujuy; Orán y General Güemes por la provincia de Salta; y Burreyacu, Cruz Alta, Leales, Simoca, Graneros, La Cocha, Juan Bautista Alberdi, Río Chico, Chicligasta, Monteros, Famaillá, Lules, Yerba Buena, Tafí Viejo y San Miguel de Tucumán (Figura 1).

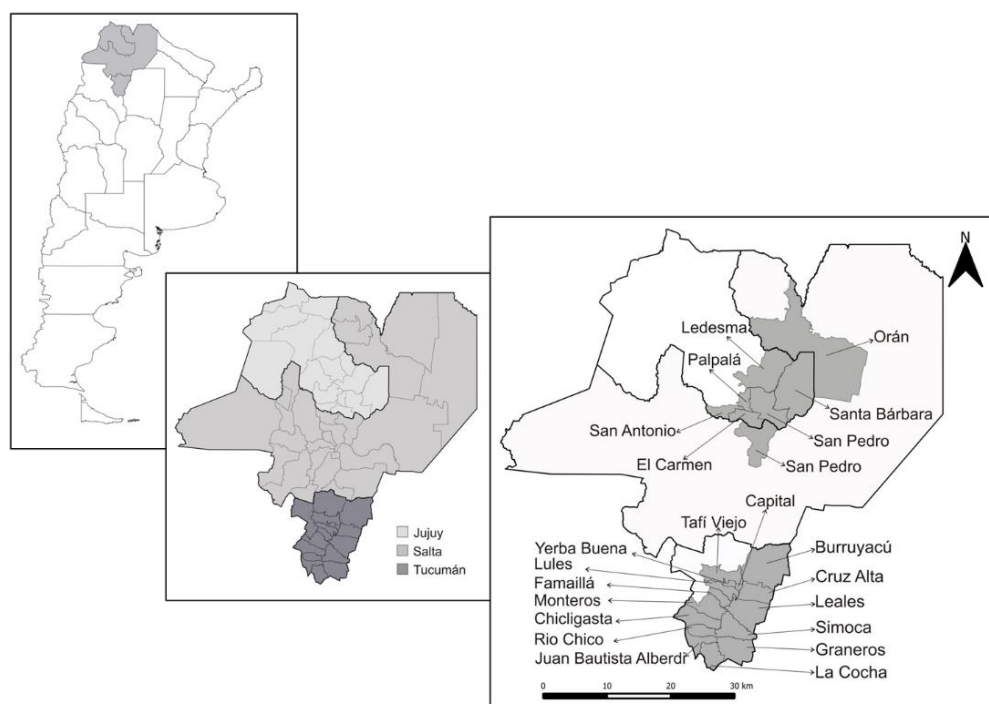


Figura 1 - Localización de las principales provincias con áreas productoras de caña de azúcar en las provincias de Salta, Jujuy y Tucumán en Argentina. Detalle de los departamentos donde encontramos caña de azúcar. Fuente: Adaptada de Benedetti (2018).

Se consideraron los meses de diciembre a marzo, cuando el cultivo es más susceptible a la plaga de roya marrón, en Argentina (Rago et al. 2012; Araújo et al. 2013). Los impactos del cambio climático se analizaron adoptando la herramienta Idrisi GIS, a partir de la base de datos geográfica de información climática de Argentina, obtenida de las proyecciones de escenarios climáticos de los modelos climáticos globales del IPCC. Se seleccionaron las variables climáticas temperatura media y humedad foliar, obteniéndose esta última a partir de la humedad relativa, según Hamada et al. (2008). El análisis prospectivo del cambio climático sobre la roya marrón de la caña de azúcar se basó en el conocimiento de la literatura y la experiencia de los autores, quienes incorporaron los efectos implícitos de la interacción del patógeno virulento, hospedador susceptible y características ambientales predisponentes para definir las reglas de favorabilidad climática para la aparición de la enfermedad. Las reglas se estructuraron utilizando criterios de lógica matemática de SIG, aplicados al clima normal (1961-1990) de la Unidad de Investigación del Clima (2015) y al clima futuro (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100), puesto a disposición por el Centro de Distribución de Datos del IPCC (2015).

Las condiciones favorables para la aparición de la enfermedad se dan con temperatura entre 16°C

y 30°C, independientemente de la humedad de la hoja, o temperatura superior a 21°C y humedad de la hoja superior a 4 h día⁻¹. Las condiciones climáticas desfavorables ocurren con una temperatura promedio por debajo de 16°C, para cualquier condición de humedad de las hojas, o con una temperatura promedio por encima de los 30°C, y una humedad de las hojas por debajo de las 4 h día⁻¹.

Se obtuvieron los datos de promedios mensuales de temperatura media (°C) y duración de periodo de mojado foliar (h/día) del período de referencia de la página del IPCC. Se construyó una tabla de doble entrada (Tabla 1), empleando las variables temperatura media y PMF (período de mojado foliar) y categorías de predisposición a la infección del patógeno: desfavorable, poco favorable, favorable y muy favorable. Esta tabla se elaboró en base a datos históricos de condiciones favorables a epidemias de roya marrón en caña de azúcar.

Se eligieron estos meses debido a que el cultivo presenta susceptibilidad hacia el patógeno y el establecimiento de la enfermedad antes de la fecundación puede ocasionar pérdidas de rendimiento.

Posteriormente se calcularon las áreas de cada categoría de predisposición para los escenarios y períodos estudiados, empleando el módulo de macromodelo de Idrisi 32.

Tabla 1 - Rangos de condiciones ambientales favorables para la infección por roya marrón temperatura media y periodo de mojado foliar (h/día) Rago et al., (2005).

Temperatura media (°C)	PMF* (h/día)	
	PMF <4	PMF ≥4
T < 16	Desfavorable	Poco favorable
16 ≤ T < 19	Poco favorable	Favorable
19 ≤ T < 21	Favorable	Muy favorable
21 ≤ T < 30	Poco favorable	Favorable
T ≥ 30	Desfavorable	Poco favorable

*PMF: Periodo de mojado foliar

3. Resultados y discusión

Los mapas de favorabilidad climática para la infección de la roya marrón en caña de azúcar confeccionados para los escenarios climáticos futuros indican que, en general, habrá un incremento de las

áreas favorables para el desarrollo de la enfermedad en la Argentina durante febrero, marzo y abril (meses de susceptibilidad del cultivo a campo), para los tres períodos proyectados (2020, 2050 y 2080), tanto para el escenario A2 (Figura 2) como para el B1 (Figura 3).

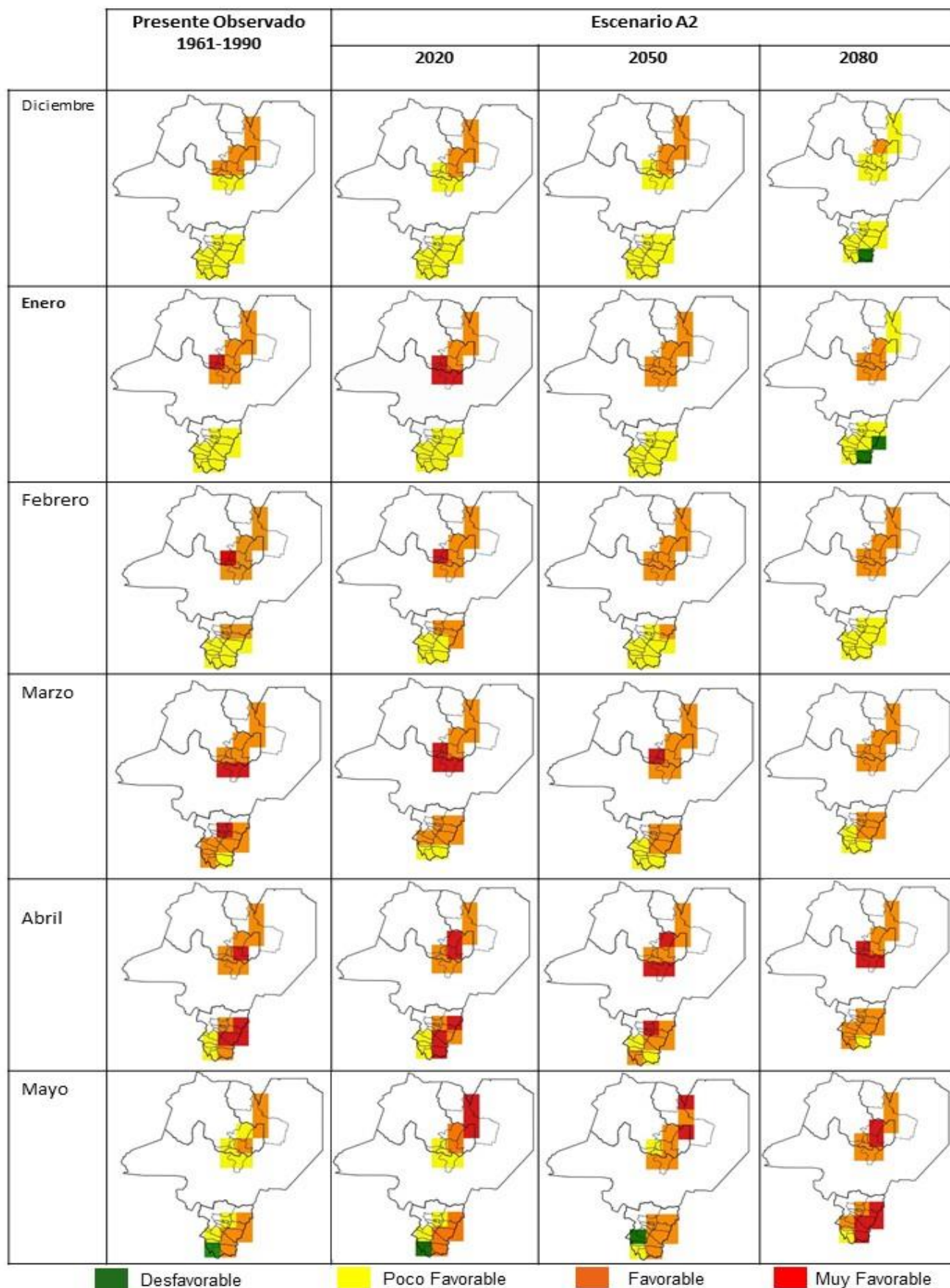


Figura 2- Condiciones predisponentes para la ocurrencia de la roya marrón (*Puccinia melanocephala*) en caña de azúcar para el período de referencia (1961-1990) y futuro (2020, 2050 y 2080) para el escenario A2 en los meses de diciembre a mayo en el área cañera de Argentina.

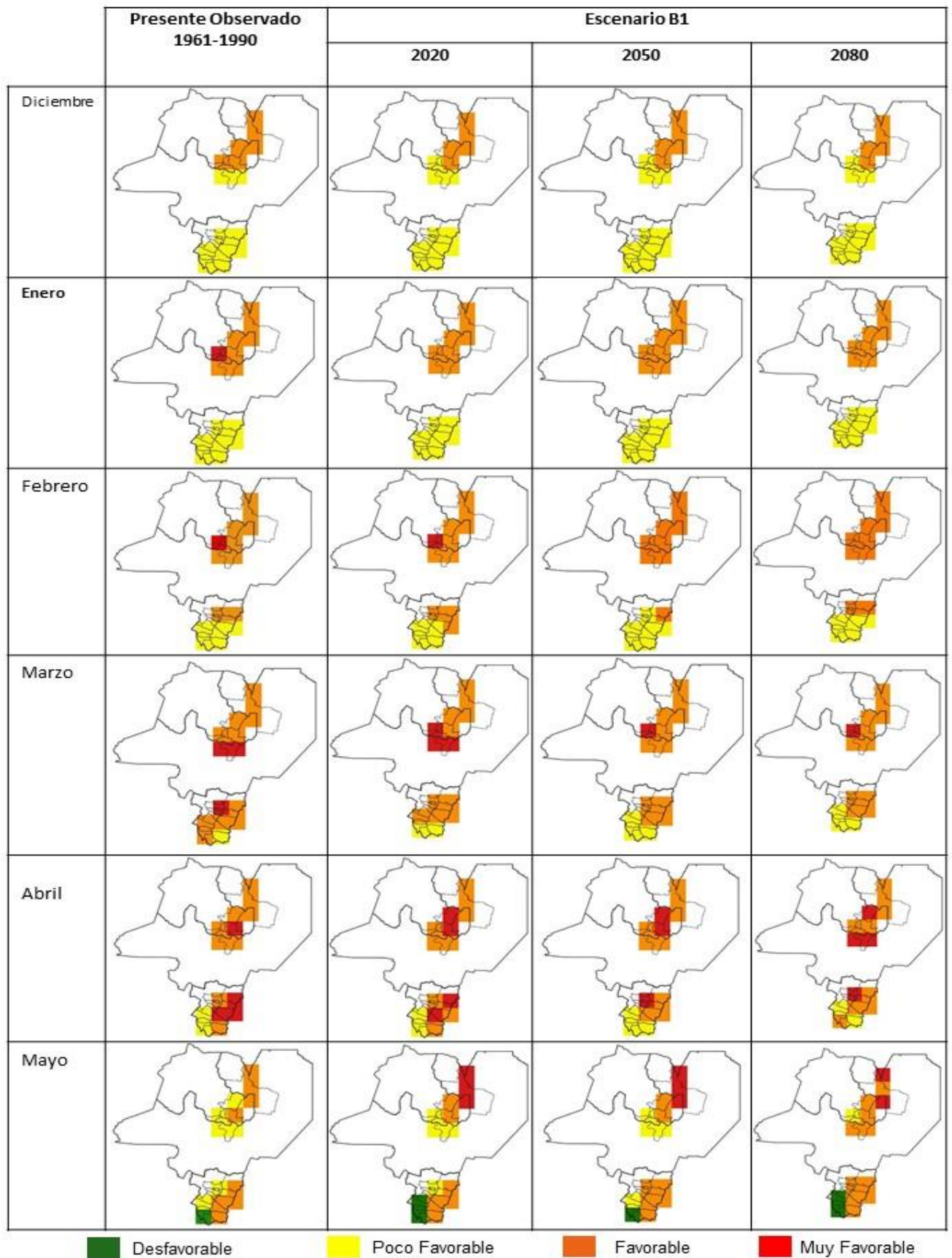


Figura 3- Condiciones predisponentes para la ocurrencia de la roya marrón (*Puccinia melanocephala*) en caña de azúcar para el período de referencia (1961-1990) y futuro (2020, 2050 y 2080) para el escenario B1 en los meses de diciembre a mayo en el área cañera de Argentina.

Un mapa alerta por recurrencia de condiciones favorables a manifestarse la enfermedad roya marrón en el área cañera de Argentina, para cada período de tiempo, (2020, 2050, 2080), y para los escenarios A2 y B1 fue elaborado (Figura 4), se destacan aquellas áreas que presentan condiciones favorables en forma reiterativa desde diciembre a

mayo. Se observa que las áreas alertas de mayor incidencia a manifestarse la enfermedad, son Salta, Jujuy y Tucumán, en los períodos 2020 y 2050, tanto para los escenarios A2 y B1. Para el período 2080, existe una baja recurrencia de favorabilidad al patógeno, para ambos escenarios.

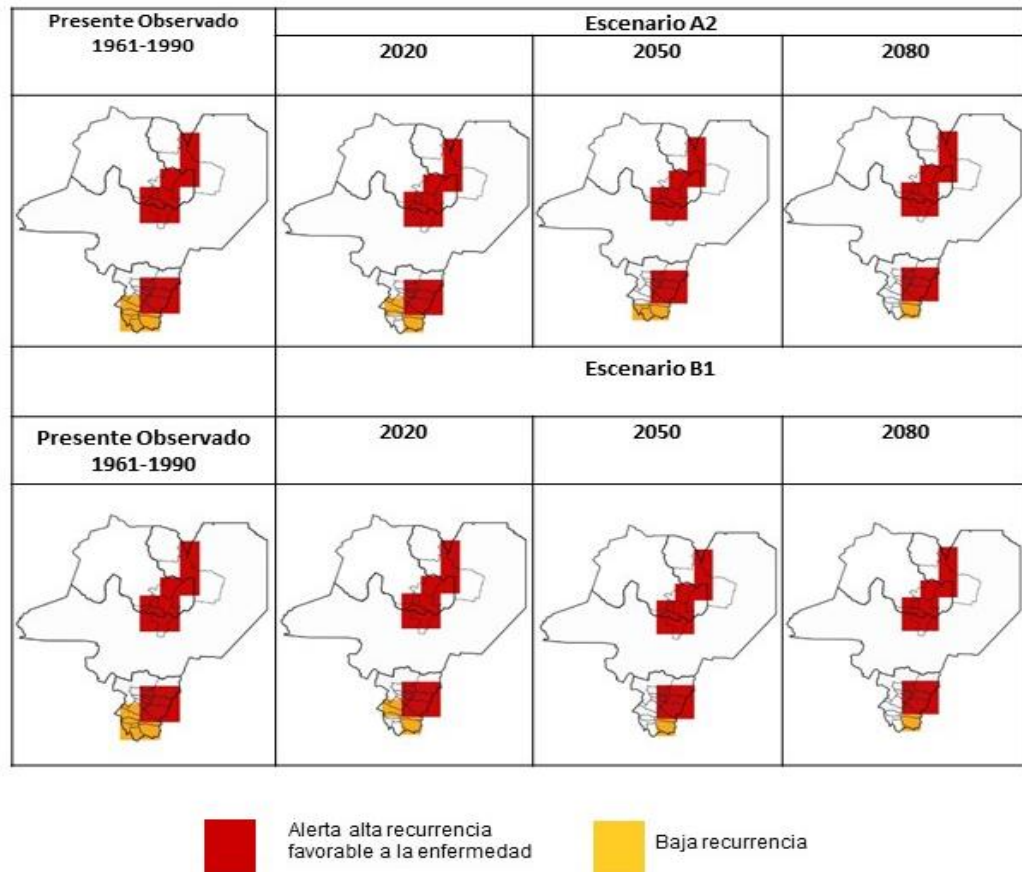


Figura 4- Mapa resumen de favorabilidad, de alerta temprana a la aparición de la enfermedad roya marrón para el período de referencia (1961-1990) y futuro (2020, 2050 y 2080) en los escenarios A2 y B1 en el área cañera de Argentina.

Para las condiciones do período de referencia, el área media con condiciones favorables (clases favorable y muy favorable) para la infección por roya marrón en caña de azúcar para los meses de diciembre a mayo, representa el 57% del área cañera argentina. La favorabilidad para la ocurrencia de la roya marrón de la caña de azúcar en las principales regiones productoras de caña de azúcar de Argentina, indican que habrá un incremento de las áreas favorables para el desarrollo de la enfermedad durante los meses de febrero, marzo y abril. Para el escenario A2 y B1 el área favorable media se estima en 48% para los períodos 2020 y 2050. En el período 2080 dicho porcentaje alcanza el 51% para el

escenario B1 y el 46% para el escenario A2 (Tabla 2). En el caso del escenario B1 (pesimista) habrá un incremento del área media para las condiciones favorables en el período 2080, y una disminución del área media en el escenario A2 (optimista) período 2080.

Para la roya marrón, los resultados indican que habrá una tendencia a aumentar las condiciones poco favorables y favorables para la manifestación de la enfermedad variando según los meses analizados, por lo que, tal como conceptualizan Hamada et al. (2008) y Ghini et al. (2008), se registraría un impacto negativo para el patosistema analizado.

Tabla 2- Áreas expresadas en km² con condiciones favorables y muy favorables para ocurrencia de roya marrón en el área cañera de Argentina, para el período de referencia (1961 a 1990) y futuro (2020, 2050 y 2080), para los escenarios A2 y B1.

Meses	Referencia 1961-1990	2020		2050		2080	
		A2	B1	A2	B1	A2	B1
Diciembre	2231	1398	2231	2231	1398	279	1398
Enero	2230	2230	2231	2231	2231	1390	2231
Febrero	2766	3047	3047	2503	2503	2231	2503
Marzo	3859	3589	3589	3318	3318	3319	3318
Abril	3588	3588	3588	3589	3318	3860	3318
Mayo	2204	2484	2484	3310	3310	3860	2756

Un resumen de la presencia del cultivo cuando la caña se hace presente en el campo volcamos los resultados obtenidos se visualiza en la Figura 5. Para los meses de diciembre a marzo, aumentan las condiciones poco favorables para la manifestación de la enfermedad. Para los meses de abril a mayo en cambio aumentan las condiciones más favorables para la enfermedad. Los meses de susceptibilidad a la

roya marrón son los meses de febrero y marzo. Las condiciones favorables a manifestarse la enfermedad roya marrón en el área cañera de Argentina, en el período (1961-1990) fueron los meses marzo y abril, y para cada período de tiempo (2020, 2050, 2080), para los escenarios A2 y B1, son los meses de marzo, abril y mayo.

Roya Marrón	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Cultivo						
Susceptibilidad						
Condición favorable 1961-1990						
Condición favorable A2						
Condición favorable B1						

Figura 5- Resumen del cultivo para caña de azúcar, susceptibilidad y favorabilidad de ocurrencia de la roya marrón en caña de azúcar para el período de referencia (1961-1990) y futuro (2020, 2050 y 2080) en los escenarios A2 y B1 en los meses de diciembre a mayo en el área cañera de Argentina.

El cambio climático afectará el crecimiento de los cultivos. En los escenarios futuros las condiciones de favorabilidad a la enfermedad seguirán estando presentes. Tal como lo expresado por Chakraborty y Datta (2003), esta situación se puede evitar con la mejora de variedades resistentes a las condiciones cambiantes. Del mismo modo, es necesario investigar estrategias de mitigación para

disminuir la vulnerabilidad del cultivo hacia esta enfermedad.

Desde el punto de vista de los modelos de simulación de riesgo de enfermedad, Juroszek y Tiedemann (2015) consideran que, al incluir varios factores climáticos y varias etapas del ciclo de vida del patógeno en el modelado de enfermedades en las proyecciones futuras de la dinámica y variación del

patógeno, los resultados podrían ser más confiables, aunque más complejos.

Para la roya marrón, los resultados indican que habrá una tendencia a aumentar las condiciones poco favorables y favorables para la manifestación de la enfermedad variando según los meses analizados, por lo que, tal como conceptualizan Hamada et al. (2008) y Ghini et al. (2008), se registraría un impacto negativo para el patosistema analizado.

4. Conclusiones

Es posible evaluar la distribución espacial y temporal del impacto de la roya marrón de la caña de azúcar en las principales áreas productoras de Argentina. Sobre la base de las proyecciones de los escenarios climáticos futuros, se puede visualizar que las condiciones de favorabilidad seguirán estando presentes en el futuro.

Las condiciones de favorabilidad apuntan a aumentar las condiciones más favorables para la ocurrencia de la roya marrón de la caña de azúcar en los meses de marzo, abril y mayo, tanto para el escenario A2 y B1. En los meses de diciembre a marzo aumentan las condiciones poco favorables en los dos escenarios. Para los meses de abril a mayo en cambio aumentan las condiciones más favorables para la enfermedad.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del proyecto "Impacto del cambio climático sobre las enfermedades de los cultivos", a través de la Agencia Brasileña de Cooperación (ABC) del Ministerio de Relaciones Exteriores y el Fondo Argentino de Cooperación Internacional (FO.AR). del Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto.

Referencias

Benedetti, P., 2018. Primer relevamiento del cultivo de caña de azúcar de la República Argentina a partir de imágenes satelitales para la campaña 2018. Noticia. Disponible: <https://inta.gov.ar/noticias/primer-relevamiento-del-area-cultivada-con-cana-en-argentina-a-traves-de-imagenes-satelitales>. Acceso: ago. 2019.

Chakraborty, S., Datta, S., 2003. How will plant pathogens adapt to host plant resistance at elevated CO₂ under a changing climate, *New Phytologist* 153, 733–742. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00842.x>.

China, A., Nass, H., Daboin, C., Diez, M.D., 2000. Enfermedades y daños de la caña de azúcar en Latinoamérica. INICA-FUNDAZUCAR,

Universidad de los Andes, Venezuela.

Comstock, J.C., Shine, J.M., Raidaid, R.N., 1992. Effect of rust on sugarcane growth and biomass. *Plant Disease* 76, 175-177.

COPERSUCAR, 1986. Ferrugem da cana-de-açúcar e sua constatação no município de Capivari. *Boletim Técnico Copersucar (Ed. especial)* 1-8.

Dean, J.L., Purdy, L. H., 1984. Races of the sugar cane rust fungus, *Puccinia melanocephala* found in Florida. *Sugar Cane* 1, 15-16..

Evans, N., Baierl, A., Semenov, M. A., Gladders, P., Fitt, B.D.L., 2008. Range and severity of plant disease increased by global warming. *Journal of The Royal Society* 5, 525-531.

Ghini, R., Hamada, E., Bettiol, W., 2008. Climate change and plant diseases. *Scientia Agricola* 65, 98-107. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000700015>.

Hamada, E., Ghini, R., Fernandes, J. L., Pedro Júnior, M.J., 2008. Spatial and temporal variability of leaf wetness duration in the State of São Paulo, Brazil. *Scientia Agricola* 65, 26-31. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000700006>

Hamada, E., Ghini, R., Rossi, P., Pedro Júnior, M., Lobato, J., 2008. Climate change and the occurrence of downy mildew in Brazilian grapevines (*Plasmopara viticola*). *Scientia Agricola* 65, 60–64.

Hamada, E., Ghini, R., 2011. Impactos del cambio climático en plagas y enfermedades de las plantas en Brasil. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2, 195-205.

Hoy, J.W., Savario, C.F., 2007. Can fungicides provide an alternative control measure for brown rust. *Journal of American Society of Sugar Cane Technologists* 27, 60.

Hoy, J.W., Hollier, C.A., 2009. Effect of brown rust on yield of sugarcane in Louisiana. *Plant Disease* 93, 1171–1174. doi: <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-11-1171>.

Juroszek, P., von Tiedemann, A., 2015. Linking plant disease models to climate change scenarios to project future risks of crop diseases: A Review. *Journal of Plant Diseases and Protection* 122, 3-15. doi: <https://doi.org/10.1007/BF03356525>

IPCC, 2000. Emissions scenarios. Nakicenovic, N., Swart, R. (ed.) Cambridge University Press, UK, pp. 570. Disponible: <https://www.ipcc.ch/report/emissions-scenarios/>. Acceso: 10 jan. 2022.

IPCC, 2005. Carbon dioxide capture and storage. Bert Metz, Ogunla de Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos and Leo Meyer (Eds.), Cambridge University Press.

IPCC, 2019. Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification,

- land degradation, sustainable land management, food security and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Disponível: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/2f.-Chapter-5_FINAL.pdf>. Acesso: 22 ago. 2019.
- Koike, H., Fontenot, D., Damann, K., Schlub, R., 1981. Smut sugarcane in Louisiana. *Plant Disease* 65, 1018.
- Matsuoka, S., 1993. Análise retrospectiva de perdas pela ferrugem da cana-de-açúcar em São Paulo. Congresso Nacional da STAB, Águas de São Pedro.
- Nazir N., Bilal S., Bhat K.A., Shah T.A., Badri, Z.A., Bhat F.A., Wani T.A., Mugal, M.N., Parveen S., Dorjey S., 2018. Effect of climate change on plant diseases. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7, 250-256. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.706.030>.
- New, M., Hulme, M., Jones, P.D., 1999. Representing Twentieth-Century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate* 12, 829-856.
- Pressley, J.T., Perdomo, R., Ayat, J.D., 1978. Sugarcane rust found in the Dominican Republic. *Plant Disease Reporter*. 62, 843.
- Purdy, L.H., Liu L.J., Dean J.L., 1983. La roya de la caña de azúcar, una enfermedad recientemente importante. *Plant Disease* 67, 1292-1296 .
- Rago, A.M., 2005. Variabilidade patogênica de *Puccinia melanocephala* e *Ustilago scitaminea* no Estado de São Paulo. Piracicaba, Esalq/USP .
- Rago, A.M., Pérez Gómez, S.G., Fontana, P.D., 2012. Roya marrón, in: INTA (ed). Caña de azúcar. Identificación y manejo de las enfermedades en Argentina. Programa Nacional de Cultivos Industriales, Córdoba, Argentina, pp 9-13.
- Raid, R.N., Comstock, J.C., 2000. A guide to sugarcane diseases. Alem Saumtally, A. (Ed.), CIRAD - ISSCT, Montpellier, pp. 85-89.
- Ryan, C.C., Egan, B.T., 1989. Rust, en: Ricaud, C., Egan, B.T., Gillaspie, A.G., Hughes, C.G. (eds.), Diseases of sugarcane, major diseases. Elsevier Science publisher B.V., The Netherlands, Amsterdam, pp.189-210.
- Sanguino A., Cardozo C.O., 1989. Influencia da ferrugem na produtividade da cana-de-açúcar. *Boletim Técnico COPERSUCAR* 47,11-13.
- Silva, M.A., Dinardo-Miranda, L.L., Almeida, A.M., Campana, M.P., Coelho, A., Landell, M.G.A., Figueiredo, P., Perecin, D., 2001. Danos causados pela ferrugem, *Puccinia melanocephala*, a variedades de cana-de-açúcar com diferentes níveis de resistência. *Summa Phytopathologica* 27, 39-43.