



## Síndrome purpúreo en soja (*Glycine max*) y su relación con variables bioclimáticas<sup>1</sup>

### Soybean (*Glycine max*) Purple Syndrome and its relationship with bioclimatic variables

M. Lavilla<sup>2</sup>, A. Ivancovich<sup>2</sup>, A. Díaz Paleo<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> Recepción: 13 de marzo, 2023. Aceptación: 18 de mayo, 2023. Este trabajo formó parte de la tesis doctoral del primer autor, realizada y financiada por la Universidad Nacional del Noroeste de la provincia de Buenos Aires (UNNOBA).
- <sup>2</sup> Universidad Nacional del Noroeste de la provincia de Buenos Aires, Laboratorio de Fitopatología, Monteagudo 2772 (2700), Pergamino, Buenos Aires, Argentina. [malavilla@comunidad.unnoba.edu.ar](mailto:malavilla@comunidad.unnoba.edu.ar) (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-7282-4696>), [ajivancovich@comunidad.unnoba.edu.ar](mailto:ajivancovich@comunidad.unnoba.edu.ar) (<https://orcid.org/0000-0002-4195-2986>).
- <sup>3</sup> Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Ruta 32 km 4,5 (2700), Pergamino, Buenos Aires, Argentina. [diazpaleo.antonio@inta.gov.ar](mailto:diazpaleo.antonio@inta.gov.ar) (<https://orcid.org/0000-0003-4252-5123>).

## Resumen

**Introducción.** El tizón foliar por *Cercospora* (TFC) y la mancha púrpura de la semilla (MPS) son dos enfermedades endémicas de soja (*Glycine max*) en la Argentina. **Objetivo.** Seleccionar las variables bioclimáticas (VB) relacionadas con los valores de severidad mayor o igual al 90 % del TFC y/o de incidencia mayor o igual al 50 % de la MPS en Argentina. **Materiales y métodos.** En la región sojera de la Argentina durante los años 2015 y 2016 se utilizaron 45 VB disponibles en Worldclim (temperaturas, precipitaciones y radiación), para la modelización con el programa MaxEnt. De los mapas obtenidos en la modelización, se extrajeron las probabilidades de una severidad (SEV) del TFC  $\geq 90$  % y/o una incidencia (I) de la MPS  $\geq 50$  % para cada punto geográfico evaluado en esta experiencia, para luego utilizarlos en la generación de las regresiones lineales múltiples. **Resultados.** De las 45 VB analizadas las que más se relacionaron con ambas enfermedades fueron la precipitación y la temperatura. La radiación fue la VB con menos asociación tanto con la severidad (SEV) del tizón foliar por *Cercospora* como con la incidencia de la mancha púrpura de la semilla. **Conclusión.** Las variables bioclimáticas temperaturas (entre los 25 °C y los 30 °C) y las precipitaciones entre los meses de diciembre a abril tuvieron las mayores asociaciones con los valores de severidad mayor o igual al 90 % del TFC y/o de incidencia mayor o igual al 50 % de la MPS en Argentina.

**Palabras claves:** fitopatología, enfermedades, climatología.

## Abstract

**Introduction.** *Cercospora* Leaf Blight (CBL) and Purple Seed Stain (PSS) are two endemic diseases of soybean (*Glycine max*) in Argentina. **Objective.** To select the bioclimatic variables (VBs) associated to the severity values equal to or greater than 90 % of the CBL and/or incidences equal to or greater than 50 % for the PSS in Argentina. **Materials and methods.** In the soybean region of Argentina between 2015 and 2016, 45 VBs available in Worldclim (temperatures, precipitations, and radiation) were used for modeling with the MaxEnt program. From the maps



obtained in the modeling, the probabilities of a severity (SEV) of CBL  $\geq 90$  % and/or an incidence (I) of PSS  $\geq 50$  % were extracted for each geographical point evaluated in this study, subsequently used in generating multiple linear regressions. **Results.** Among of the 45 analyzed VBs, precipitation and temperature showed the strongest association with both diseases. Radiation exhibited the least association with both *Cercospora* Leaf Blight severity (SEV) and Purple Seed Stain incidence. **Conclusion.** Bioclimatic variables such as temperatures (between 25 °C and 30 °C) and precipitation between the months of December to April exhibited the strongest associations with severity values equal to or greater than 90 % of the CBL and/or incidences equal to or greater than 50 % for PSS in Argentina.

**Keywords:** phytopathology, diseases, climatology.

## Introducción

El síndrome purpúreo en soja (SPS), nombre que abarca las enfermedades tizón foliar por *Cercospora* (TFC) y mancha púrpura de la semilla (MPS), causadas por el mismo patógeno (*Cercospora kikuchii*). Esta enfermedad se presenta, por lo general, en períodos reproductivos avanzados del cultivo de soja (*Glycine max*) y se manifiesta con lesiones rojo-violáceas angulares o irregulares sobre ambas caras de la hoja (Lavilla et al., 2022b). Bajo infecciones severas, se observa necrosis de coloración pardo – violácea en tallos, pecíolos y hojas, asociadas a la presencia de una toxina fotoactiva denominada cercosporina (Lavilla et al., 2022b). El SPS causa defoliación prematura que reduce el llenado de los granos, su peso (mg) y afecta el rendimiento (Lavilla et al., 2022b). En las semillas, *Cercospora kikuchii* induce una coloración violácea causada también por la toxina que produce el patógeno (Lavilla et al., 2022b).

La cuantificación del SPS en el follaje y en la semilla, es importante para la elaboración de estrategias de manejo integrado de la enfermedad. La patometría es la ciencia y/o arte de medir las enfermedades en los cultivos (Lavilla et al., 2021). Los estudios para conocer la intensidad y la prevalencia de una enfermedad son los primeros pasos para comprender la relación entre una enfermedad y las pérdidas cuantitativas y/o cualitativas en el rendimiento (Lavilla & Ivancovich, 2021).

El hongo *C. kikuchii* es un patógeno policíclico, que cada doce días desarrolla una nueva generación de conidios cuando la humedad relativa es superior a 80 % y las temperaturas oscilan entre 23 °C y 27 °C (Lavilla et al., 2022b). En las semillas con elevada incidencia de mancha púrpura de la semilla (MPS), el patógeno puede afectar a los cotiledones e iniciar las infecciones en las plántulas. A su vez, los conidióforos y conidios que se desarrollan pueden ser dispersados por el viento y el salpicado de las gotas de lluvia, lo que provocará infecciones secundarias (Hartman et al., 2015; Lavilla et al., 2022b).

La severidad del TFC del 90 % y la incidencia del 50 % de la MPS, se consideraron umbrales superiores que enmarcan regiones de máximo riesgo para el cultivo de soja expuesto a *C. kikuchii* y, por lo tanto, de alto interés. Los umbrales son definidos en relación a años de trabajo en el cultivo de soja y su interacción con el patógeno *C. kikuchii* y las enfermedades que este provoca (Lavilla et al., 2021; Lavilla et al., 2022a; Lavilla et al., 2022b).

Se especula que la severidad e incidencia del TFC y la MPS son asimilables a densidad y distribución geográfica del cultivo de soja. Las características particulares de *C. kikuchii* en Argentina, permiten aplicar este modelo. La distribución de *C. kikuchii*, no sería afectada por los genotipos de los cultivares de soja distribuidos en el país, ya que todos son susceptibles al patógeno, por lo tanto, la población del hongo se modificaría por las variables bioclimáticas (VB) y no por el genotipo de la planta hospedante (Lavilla et al., 2022b).

La amplia distribución geográfica del cultivo de soja en Argentina, que incluye grandes variaciones en los valores de las VB, favorece y enriquece los estudios de asociación con las variables severidad e incidencia. Las VB derivan de los valores promedio mensuales de la temperatura y de la precipitación de treinta años (1970 a 2000), y

representan las tendencias anuales (como el promedio de temperatura anual y precipitación anual), la estacionalidad (como el rango anual de temperatura y precipitación) y los factores ambientales limitantes (Fick & Hijmans, 2017).

El objetivo de esta investigación es seleccionar las variables bioclimáticas relacionadas con los valores de severidad mayor o igual al 90 % del TFC y/o de incidencia mayor o igual al 50 % de la MPS en Argentina.

## Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en la región sojera de la Argentina durante los años 2015 y 2023. El relevamiento patométrico tanto del tizón foliar por *Cercospora* (TFC) como de la mancha púrpura de la semilla (MPS), causadas por el mismo patógeno, a campo en las diferentes regiones sojeras de la Argentina, se realizaron durante los años 2015 y 2016 (Lavilla et al., 2021). Los análisis y discusión de los datos tuvieron lugar en el laboratorio de Fitopatología de la Universidad Nacional del Norte de la provincia de Buenos Aires (localidad de Pergamino) entre los años 2016 y 2023.

Esta investigación se llevó a cabo con los datos patométricos ya publicados por Lavilla et al. (2021), con la premisa de seleccionar solo los puntos geográficos para la determinación de la probabilidad bioclimática de encontrar una severidad del TFC mayores o igual al 90 % ( $SEVTFC \geq 90$ ) y/o una incidencia de la MPS mayores o iguales al 50 % ( $IMPS \geq 50$ ).

Se asociaron 45 variables bioclimáticas (VB) publicadas en WorldClim (Fick & Hijmans, 2017) con las variables patométricas  $SEVTFC \geq 90$  e  $IMPS \geq 50$ , con el modelo logístico del programa de máxima entropía (MaxEnt) (Bonney et al., 2009; Phillips et al., 2006) en cada año de estudio y en el promedio de los años 2015 y 2016 (Lavilla et al., 2021). El programa MaxEnt, produce curvas de respuesta que fueron obtenidas con variables independientes, las cuales relacionan la evolución de las enfermedades con las VB (Elith et al., 2010).

Todas las variables utilizadas fueron interpoladas a una resolución espacial de 2,5 minutos y convertidas a formato ASCII a partir del programa (QGIS, 2023). A los mapas generados por MaxEnt en formato ASCII (Elith et al., 2010; Phillips et al., 2006), luego de la modelización para los dos años y el promedio de los mismos, se los transformó con el programa QGIS versión 3.2 a formato TIFF (QGIS, 2023). A partir de los mapas en formato TIFF se extrajeron las probabilidades de una  $SEVTFC \geq 90$  y/o una  $IMPS \geq 50$  para cada punto geográfico (PG) evaluado en esta experiencia, para luego utilizarlos en la generación de las regresiones lineales múltiples (RLM) con el paquete estadístico de InfoStat (Di Rienzo et al., 2011). Para el mapeo y análisis de los datos geográficos obtenidos para ambas enfermedades se utilizó el programa DIVA GIS 7.1.6 (Byass, 2009).

## Resultados

Las variables bioclimáticas (VB) con mayor contribución sobre la probabilidad de una severidad del tizón foliar por *Cercospora* (TFC) ( $SEVTFC \geq 90$ ) (PSEVTFC), luego de la modelización logística obtenida a partir del programa MaxEnt, se detallan en el Cuadro 1 para el año 2015, 2016 y para el promedio de ambos años.

Las variables bioclimáticas (VB) que hacen referencia a las precipitaciones medias en el mes de marzo (Pre03) y a las de abril (Pre04), tuvieron la mayor contribución en la severidad del tizón foliar por *Cercospora* (TFC) [ $(SEVTFC \geq 90)$  la  $PSEVTFC \geq 90$ ] en 2015 (Cuadro 1) que en 2016 y el promedio de los años. En cambio, solo las Pre03 contribuyeron en la evolución del TFC en 2016 y en el promedio de ambos años (Cuadro 1). En los años 2015 y 2016 las precipitaciones en el mes de marzo fueron cercanas a 200 mm lo que favoreció la  $PSEVTFC \geq 90$ .

La variable bioclimática (VB) que más contribuyó sobre la  $PSEVTFC \geq 90$  durante el año 2015, fue la temperatura media en el mes de enero (Tmed01). Sin embargo, la estacionalidad de la temperatura (BIO4) fue

**Cuadro 1.** Variables bioclimáticas (VB) con mayor contribución para una probabilidad de una severidad mayor o igual al 90 % del tizón foliar por *Cercospora* (TFC) para el año 2015, 2016 y para el promedio en ambos años en soja (*Glycine max*). Pergamino, Buenos Aires Argentina.

**Table 1.** Bioclimatic variables (VB) with the greatest contribution for a probability of a *Cercospora* Leaf Blight (TFC) severity equal to or greater than 90 % for the year 2015, 2016, and the average of both years in soybean (*Glycine max*). Pergamino, Buenos Aires Argentina.

| 2015          |                | 2016          |                | Promedio de 2015 y 2016 |                |
|---------------|----------------|---------------|----------------|-------------------------|----------------|
| VB            | Contribución % | VB            | Contribución % | VB                      | Contribución % |
| <b>Tmed01</b> | 30,6           | <b>BIO4</b>   | 31,9           | <b>BIO4</b>             | 31,8           |
| <b>BIO3</b>   | 11,1           | <b>BIO13</b>  | 22             | <b>BIO13</b>            | 26,1           |
| <b>Prec03</b> | 10,9           | <b>BIO15</b>  | 13,7           | <b>BIO15</b>            | 13             |
| <b>R12</b>    | 10,2           | <b>Prec03</b> | 9              | <b>BIO3</b>             | 9,7            |
| <b>Prec04</b> | 10,1           | <b>R01</b>    | 5,3            | <b>Prec03</b>           | 7,9            |
| <b>R03</b>    | 9,3            |               |                |                         |                |
| <b>Total</b>  | 82,2           | <b>Total</b>  | 81,9           | <b>Total</b>            | 88,5           |

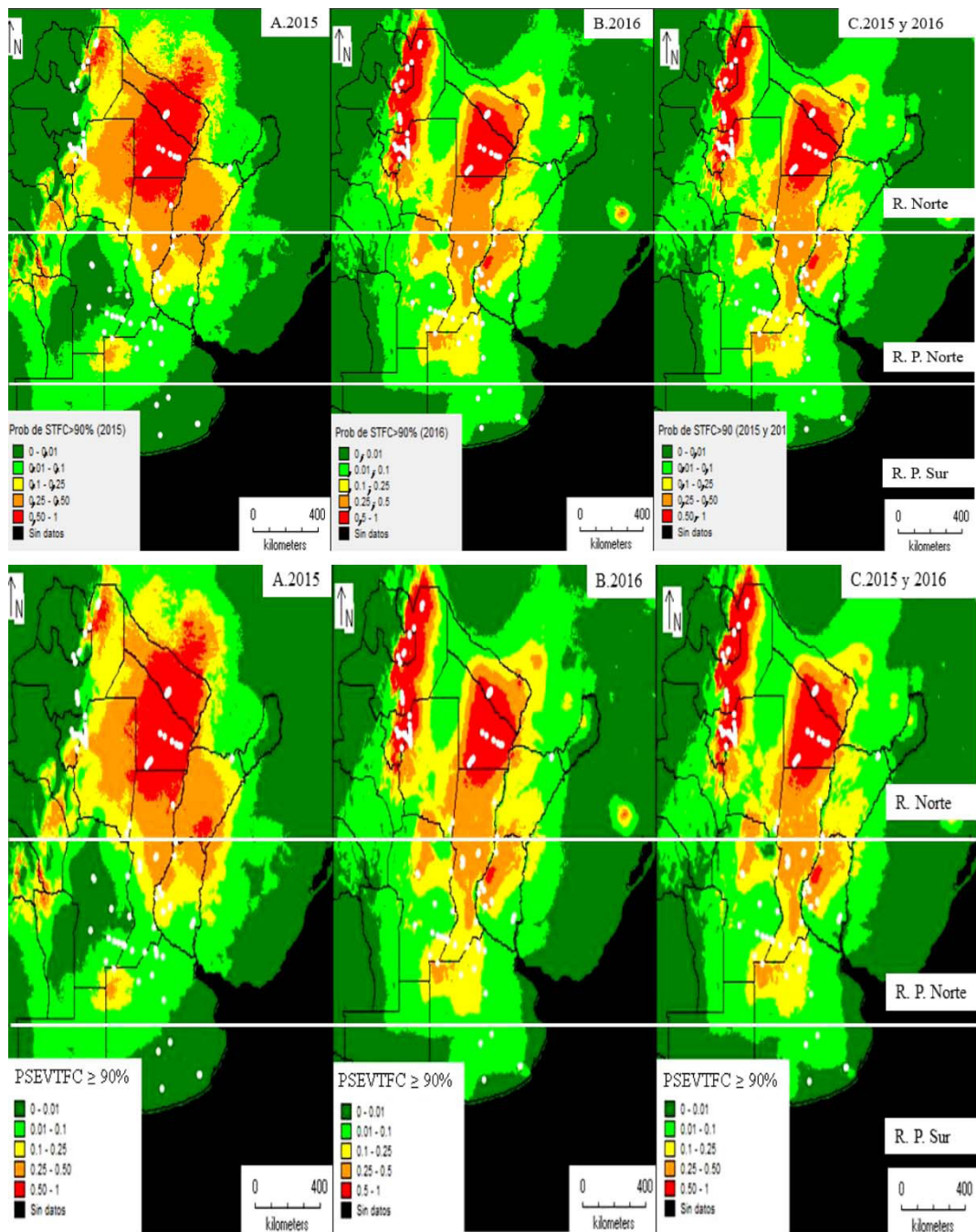
Tmed01: temperatura media en el mes de enero (°C); BIO3: isothermalidad (%), Prec03: precipitaciones (mm) media en el mes de marzo, BIO4: estacionalidad de la temperatura (%), Prec04: precipitaciones medias en el mes de abril, BIO13: precipitaciones en el mes más húmedo, R01: radiación del mes de enero, BIO15: estacionalidad de las precipitaciones, R03: radiación en el mes de marzo, R12: radiación (kJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>) del mes de diciembre. / Tmed01: mean temperature in the month of January (°C); BIO3: isothermality (%), Prec03: mean precipitation (mm) in the month of March, BIO4: temperature seasonality (%), Prec04: mean precipitation in the month of April, BIO13: precipitation in wettest month, R01: radiation in the month of January, BIO15: precipitation seasonality, R03: radiation in the month of March, R12: radiation (kJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>) in the month of December.

la VB que más contribuyó en la PSEVTFC  $\geq 90$  en 2016 y en el promedio de ambos años. Las VB denominadas precipitaciones en el mes más húmedo (BIO13) y estacionalidad de las precipitaciones (BIO15), influyeron de manera positiva sobre la PSEVTFC  $\geq 90$  en 2016 y en el promedio de ambos años.

La PSEVTFC  $\geq 90$  ha presentado un comportamiento dispar en relación a la isothermalidad (BIO3), en el año 2015 tuvo una asociación negativa. En cambio, para el promedio de ambos años la PSEVTFC  $\geq 90$  presentó una asociación positiva hasta el 50 % de isothermalidad. La radiación tuvo una asociación positiva con la PSEVTFC  $\geq 90$  para ambos años. La radiación de los meses de diciembre (R12; 2015), marzo (R03; 2015) y enero (R01; 2016) incrementaron la PSEVTFC  $\geq 90$ .

Los modelos predictivos de las condiciones ambientales dieron como resultado que la región norte (N) presentó una mayor PSEVTFC  $\geq 90$ . La PSEVTFC  $\geq 90$  fue superior al 50 % para una porción importante del territorio de la región N en 2015. La región Pacífico (PN) presentó mayores rangos de PSEVTFC  $\geq 90$ , entre el 10 % y el 25 %, en el centro oeste de Córdoba, sur de Santa Fe y noroeste de Buenos Aires en 2016 y en el promedio de ambos años. La región Pacífico Sur (PS) fue la que menor PSEVTFC  $\geq 90$  tuvo, con un rango entre el 0 % y el 10 %, en ambos años (Figura 1).

Las RLM en todas las regiones tuvieron como VB en común a las precipitaciones en el mes más húmedo (BIO13; Cuadro 2). Las precipitaciones en el mes de marzo presentaron una asociación significativa y positiva frente al TFC (pendiente  $1 \times 10^{-2}$ ;  $p < 0,05$ ). *C. kikuchii* es un patógeno necrotrófico que requiere mínimo 48 h con humedad relativa superior al 100 % para que sus estructuras vegetativas germinen e infecten al cultivo de soja. Los niveles de SEV del TFC se asociaron de manera positiva con las mayores frecuencias de precipitaciones y un incremento en la cantidad de días con elevada humedad relativa (50 % - 100 %) que favorece a la enfermedad.



**Figura 1.** Modelos predictivos de condiciones ambientales adecuadas para una severidad mayor o igual al 90 % del tizón foliar por *Cercospora* causado por *Cercospora kikuchii*. A. 2015, B. 2016, C. 2015 y 2016. PSERTFC  $\geq$  90 %: probabilidad de una severidad del tizón foliar por *Cercospora*  $\geq$  90 %. Pergamino, Buenos Aires Argentina, 2015 a 2016.

**Figure 1.** Predictive models of suitable environmental conditions suitable for *Cercospora* Leaf Blight severity equal to or greater than 90 %, caused by *Cercospora kikuchii*. A. 2015, B. 2016, C. 2015 and 2016. PSERTFC  $\geq$  90 %: probability of *Cercospora* Leaf Blight severity  $\geq$  90 %. Pergamino, Buenos Aires Argentina, 2015 to 2016.

La radiación de los meses de diciembre y marzo (2015) y de enero (2016) se asociaron de manera positiva con la  $PSEVTFC \geq 90\%$  (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Regresiones lineales múltiples de severidad del tizón foliar por *Cercospora* (TFC) causado por *Cercospora kikuchii* y su asociación con las variables bioclimáticas. Pergamino, Buenos Aires Argentina, 2015 a 2016.

**Table 2.** Multiple linear regressions of *Cercospora* Leaf Blight (TFC) severity caused by *Cercospora kikuchii* and its association with bioclimatic variables. Pergamino, Buenos Aires Argentina, 2015 to 2016.

| Variable dependiente | Región              | Variable bioclimática | N    | R <sup>2</sup> | Coefficiente parcial  | p-valor              |        |
|----------------------|---------------------|-----------------------|------|----------------|-----------------------|----------------------|--------|
| Severidad TFC        | Norte (N)           | Constante             | 332  | 0,71           | -2,96                 | <0,0001              |        |
|                      |                     | BIO3                  |      |                | $5 \times 10^{-2}$    | <0,0001              |        |
|                      |                     | BIO15                 |      |                | $1 \times 10^{-2}$    | <0,0001              |        |
|                      |                     | Pre03                 |      |                | $1 \times 10^{-2}$    | <0,0001              |        |
|                      |                     | BIO13                 |      |                | $4,6 \times 10^{-3}$  | <0,0001              |        |
|                      | Pacífico Norte (PN) | Constante             | 176  | 0,95           | 1,05                  | 0,0016               |        |
|                      |                     | BIO13                 |      |                | $-7 \times 10^{-2}$   | <0,0001              |        |
|                      |                     | Pre03                 |      |                | $1 \times 10^{-2}$    | <0,0001              |        |
|                      |                     | BIO3                  |      |                | $6 \times 10^{-2}$    | <0,0001              |        |
|                      |                     | (BIO13) <sup>2</sup>  |      |                | $2,8 \times 10^{-4}$  | <0,0001              |        |
|                      | Pacífico Sur (PS)   | BIO4                  | 20   | 0,88           | $1 \times 10^{-3}$    | <0,0001              |        |
|                      |                     | Constante             |      |                | $-1,5 \times 10^{-1}$ | <0,0001              |        |
|                      |                     | BIO13                 |      |                | $1,1 \times 10^{-3}$  | <0,0001              |        |
|                      |                     |                       | BIO4 |                |                       | $1,2 \times 10^{-4}$ | 0,0685 |

VB mencionadas en el cuadro: BIO3: isothermalidad (%), BIO15: estacionalidad de las precipitaciones (coeficiente de variación), Pre03: precipitaciones (mm) media en el mes de marzo, BIO13: precipitaciones en el mes más húmedo, BIO4: estacionalidad de la temperatura (desvío estándar). / VB mentioned in the table: BIO3: isothermality (%), BIO15: precipitation seasonality (coefficient of variation), Pre03: mean precipitation (mm) in the month of March, BIO13: precipitation in wettest month, BIO4: temperature seasonality (standard deviation).

Las variables bioclimáticas (VB) con mayor contribución sobre la probabilidad de una I mayor o igual al 50 % de la MPS luego de la modelización con el programa MaxEnt, se detallan en el Cuadro 3 para los años 2015, 2016 y para el promedio de ambos años.

Las VB isothermalidad (BIO3), las precipitaciones (mm) del mes de enero (Pre01) y las de marzo (Pre03), tuvieron las mayores contribuciones sobre la probabilidad de la incidencia mayor o igual al 50 % de la MPS (PIMPS  $\geq 50\%$ ) para 2015, 2016 y para el promedio en ambos años, 26,7 %, 27,5 % y 26,3 %, respectivamente (Cuadro 3). La isothermalidad de 2015 presentó una asociación negativa con la PIMPS  $\geq 50\%$ . En el promedio de ambos años las PIMPS  $\geq 50\%$  fueron más importantes con elevadas Pre03.

En 2015 la precipitación media en el cuatrimestre más frío (BIO19) y temperatura mínima en el mes más frío (BIO6), presentaron un efecto importante sobre la contribución sobre PIMPS  $\geq 50\%$  (Cuadro 3). Sin embargo, estas VB no fueron congruentes a las condiciones ambientales que requiere el cultivo de soja para sobrevivir, y

**Cuadro 3.** Variables bioclimáticas (VB) con mayor contribución sobre una incidencia mayor o igual al 50 % de la mancha púrpura de la semilla (MPS) causada por *Cercospora kikuchii*, para los años 2015 y 2016 y para el promedio en ambos años. Pergamino, Buenos Aires Argentina, 2015 a 2016.

**Table 3.** Bioclimatic variables (VB) with the greatest contribution to an incidence equal to or greater than 50 % of Purple Seed Stain (PSS) caused by *Cercospora kikuchii*, for the years 2015 and 2016, and for the average across both years. Pergamino, Buenos Aires Argentina, 2015 to 2016.

| 2015         |                | 2016         |                | 2015 y 2016  |                |
|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| VB           | Contribución % | VB           | Contribución % | VB           | Contribución % |
| BIO3         | 26,7           | Pre01        | 27,5           | Pre03        | 26,3           |
| Pre03        | 23,2           | BIO3         | 25,7           | R03          | 25,4           |
| BIO19        | 12,1           | Pre03        | 22             | Pre02        | 21,6           |
| BIO6         | 8,2            | Tmin01       | 14,3           | Tmin01       | 12,4           |
| Tmin01       | 8,2            |              |                |              |                |
| Pre12        | 7              |              |                |              |                |
| <b>Total</b> | <b>85,4</b>    | <b>Total</b> | <b>89,5</b>    | <b>Total</b> | <b>85,7</b>    |

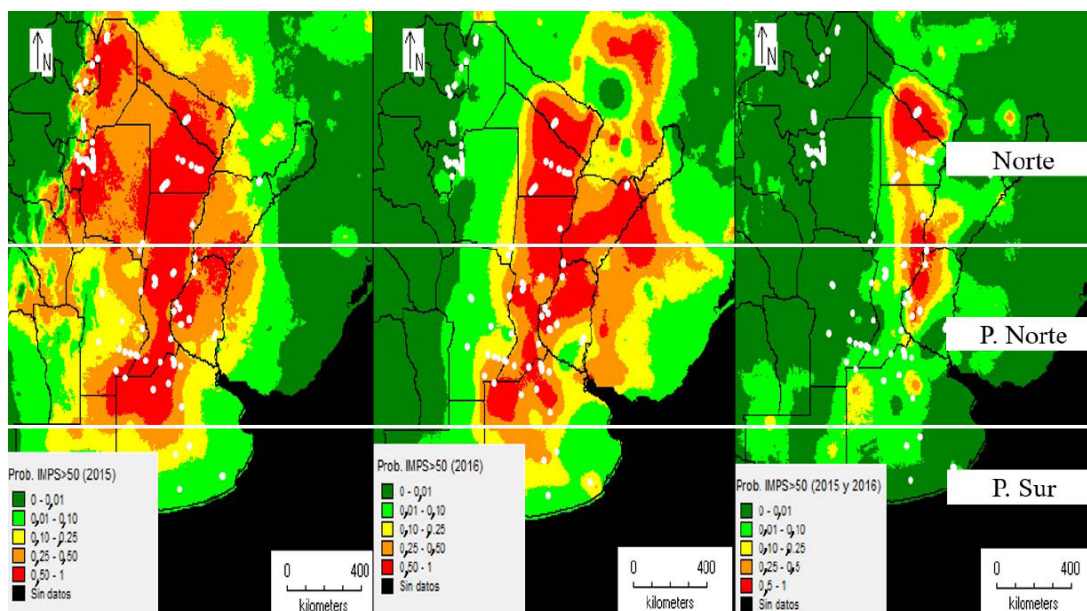
VB mencionadas en el cuadro: BIO3: isothermalidad (%); Pre03: precipitaciones (mm) media en el mes de marzo; BIO19: precipitaciones medias en el cuatrimestre más frío; BIO6: temperatura mínima en el mes más frío; Tmin01: temperatura (°C) mínima en el mes de enero; Pre12: precipitaciones medias en el mes de diciembre; Pre01: precipitaciones medias en el mes de enero; R03: radiación media ( $\text{kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) media en el mes de marzo; Pre02: precipitaciones medias en el mes de febrero. / VB mentioned in the table: BIO3: isothermality (%); Pre03: mean precipitation (mm) in the month of March; BIO19: mean precipitation in the coldest four-months; BIO6: minimum temperature in the coldest month; Tmin01: minimum temperature (°C) in the month of January; Pre12: mean precipitation in the month of December; Pre01: mean precipitation in January; R03: mean radiation ( $\text{kJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) in March; Pre02: mean precipitation in the month of February.

por lo tanto, no fueron analizadas. Las precipitaciones (mm) medias en el mes de diciembre (Pre12; 2015) y las de febrero (Pre02; promedio de ambos años), influenciaron de forma positiva a la PIMPS  $\geq 50$  % (Cuadro 3). La radiación en el mes de marzo (R03) tuvo una contribución importante (25,4 %) sobre la PIMPS  $\geq 50$  % en el promedio de ambos años (Cuadro 3).

Los modelos predictivos de las condiciones ambientales dieron como resultado que en las regiones N y PN hubiera una mayor probabilidad de tener una incidencia mayor o igual al 50 % de la MPS. Dicha probabilidad se modeló con valores más altos a partir de los valores de campo de 2015 (Figura 2).

Las precipitaciones medias (mm) en el mes de febrero (Pre02) y las temperaturas (°C) mínimas en el mes de enero (Tmin01), fueron las variables bioclimáticas más significativas en la región N y en la PN frente a la PIMPS  $\geq 50$  %. Las Pre02 presentaron una pendiente negativa y significativa (Cuadro 4), es decir, que a mayores precipitaciones en febrero menor fue la PIMPS  $\geq 50$  %. Las temperaturas mínimas en el mes de enero tuvieron un efecto positivo, es decir, cuanto mayor fue la temperatura mínima en dicho mes, mayor fue la PIMPS  $\geq 50$  % (Cuadro 4).

En la región PN, las precipitaciones en el mes de marzo presentaron una respuesta positiva y significativa con relación a la PIMPS  $\geq 50$  % (pendiente:  $4,7 \times 10^{-3}$ ;  $p < 0,05$ ). En la región PS la única VB que presentó un efecto positivo y significativo frente a la PIMPS  $\geq 50$  % fue la radiación media ( $\text{kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) en el mes de marzo (pendiente:  $5,8 \times 10^{-5}$ ;  $p < 0,05$ ; Cuadro 4). Sin embargo, la tasa de incremento de la PIMPS  $\geq 50$  % por unidad de radiación fue muy baja ( $5,8 \times 10^{-5}$ ; Cuadro 4).



**Figura 2.** Modelos predictivos de condiciones ambientales adecuadas para una incidencia mayor o igual al 50 % de la mancha púrpura de la semilla (MPS) causada por *Cercospora kikuchii*. A. 2015, B. 2016, C. Promedio de los años 2015 y 2016. PIMPS  $\geq 50$  %: probabilidad de una incidencia de mancha púrpura de la semilla  $\geq 50$  %. Pergamino, Buenos Aires Argentina, 2015 a 2016.

**Figure 2.** Predictive models of suitable environmental conditions for an incidence equal to or greater than 50 % of Purple Seed Stain (MPS) caused by *Cercospora kikuchii*. A. 2015, B. 2016, C. Average of the years 2015 and 2016. PIMPS  $\geq 50$  %: probability of Purple Seed Stain incidence  $\geq 50$  %. Pergamino, Buenos Aires Argentina, 2015 to 2016.

**Cuadro 4.** Regresiones lineales múltiples de la incidencia de la mancha púrpura de la semilla (MPS) causada por *Cercospora kikuchii*, y su asociación con las variables bioclimáticas. Pergamino, Buenos Aires Argentina, 2015 a 2016.

**Table 4.** Multiple linear regressions of the Purple Seed Stain (MPS) incidence caused by *Cercospora kikuchii*, and its association with bioclimatic variables. Pergamino, Buenos Aires Argentina, 2015 to 2016.

| Variable dependiente | Región              | Variable bioclimática | N      | R <sup>2</sup> | Coefficiente parcial  | p-valor              |        |
|----------------------|---------------------|-----------------------|--------|----------------|-----------------------|----------------------|--------|
| Incidencia de la MPS | Norte (N)           | Constante             | 332    | 0,54           | $-5,7 \times 10^{-1}$ | 0,0011               |        |
|                      |                     | Tmin01                |        |                | $8 \times 10^{-2}$    | <0,0001              |        |
|                      |                     | Pre02                 |        |                | $-1 \times 10^{-2}$   | <0,0001              |        |
|                      | Pacífico Norte (PN) | Constante             | 176    | 0,78           | $-4,5 \times 10^{-1}$ | 0,0005               |        |
|                      |                     | Pre02                 |        |                | $-1 \times 10^{-2}$   | <0,0001              |        |
|                      |                     | Pre03                 |        |                | $4,7 \times 10^{-3}$  | <0,0001              |        |
|                      | Pacífico Sur (PS)   | Tmin01                | 20     | 0,58           | $6 \times 10^{-2}$    | <0,0001              |        |
|                      |                     | Constante             |        |                | $-6,2 \times 10^{-1}$ | 0,0003               |        |
|                      |                     |                       | R03    |                |                       | $5,8 \times 10^{-5}$ | 0,0051 |
|                      |                     |                       | Tmin01 |                |                       | $-2 \times 10^{-2}$  | 0,1072 |

VARIABLES BIOLIMÁTICAS MENCIONADAS EN EL CUADRO: Tmin01: temperatura mínima del mes de enero (°C), Pre02: precipitaciones medias del mes febrero (mm), Pre03: precipitaciones medias del mes marzo (mm), R03: radiación de marzo ( $\text{kJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ). / BIOCLIMATIC VARIABLES MENTIONED IN THE TABLE: Tmin01: minimum temperature in the month of January (°C), Pre02: mean precipitation in the month of February (mm), Pre03: mean precipitation in the month of March (mm), R03: radiation of March ( $\text{kJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ).

## Discusión

La selección de las variables bioclimáticas (VB) y de los puntos geográficos en donde las enfermedades fueron más importantes, tuvieron en consideración las condiciones ambientales donde el patógeno causal del tizón foliar por *Cercospora* (TFC) y de la mancha púrpura de la semilla (MPS) pueda sobrevivir y desarrollar su ciclo de vida (Phillips & Dudík, 2008; Soberón & Peterson, 2004). Las VB más relacionadas con la probabilidad de visualizar una severidad del TFC  $\geq 90\%$  (PSEVTFC $\geq 90$ ) fueron la temperatura y las precipitaciones, mientras que la radiación fue la VB que menos relación tuvo con la PSEVTFC $\geq 90$ . Sin embargo, la asociación entre la radiación solar y la severidad (SEV) del TFC debería ser estudiada con más profundidad. El agente causal del TFC genera una toxina fotoactiva llamada cercosporina que se sabe, tiene relación con la virulencia del hongo (Upchurch et al., 1991).

Las enfermedades de fin de ciclo en soja, de las cuales forma parte el TFC, presentaron los mayores valores de severidad en los meses de marzo y abril, que son coincidentes con los estados fenológicos más avanzados en el cultivo. Las VB que más influyeron sobre la PSEVTFC $\geq 90$  fueron las precipitaciones medias en el mes de marzo (Pre03) y las de abril (Pre04). Los niveles de SEV del TFC registrados en  $R_7$  (Fehr et al., 1971) se asociaron significativamente con las precipitaciones, con aquellas que superaron el umbral de 7 mm por día entre  $R_3$  a  $R_5$  (Carmona et al., 2010; Fehr et al., 1971).

Las temperaturas tuvieron un efecto positivo a lo largo del tiempo sobre la enfermedad, con mayor relevancia en los rangos de temperaturas entre los 23 °C y 27 °C (Lavilla et al., 2022b). La radiación fue la VB que menos influencia tuvo sobre la PSEVTFC $\geq 90\%$ . Además, pudieron asociarse de manera positiva a la radiación de los meses de diciembre ( $R_{12}$ ; 2015), marzo ( $R_{03}$ ; 2015) y enero ( $R_{01}$ ; 2016). Además, se observó una asociación positiva entre la radiación ultravioleta-B (UV-B, 280-320nm) y la mancha foliar por *Cercospora* en remolacha azucarera causada por *C. beticola*, que produce una reducción en el contenido de clorofila, el peso seco del follaje y las raíces de almacenamiento (Panagopoulos et al., 1992). También se ha reportado un aumento en la producción de conidios en las diferentes especies de *Cercospora* cuando aumentaba la irradiancia en los aislamientos (Pei et al., 2014).

Se ha demostrado que aquellos factores bióticos, como el TFC, que generen defoliación prematura en soja entre  $R_4$ - $R_6$ , reducen significativamente su rendimiento en granos (Kantolic et al., 2007), situación compatible con la severidad estudiada. La PSEVTFC  $\geq 90\%$  más importante en el cultivo de soja, en ambos años y en su promedio, se observaron en las regiones N y PN, lo que indica que el rendimiento podría ser afectado significativamente por el TFC. En Brasil observaron que las epifitias de mancha gris en maíz causada por *C. zea-maydis*, son más severas en maíces de siembra de segunda. Las fechas de siembra tardías hacen coincidir el llenado de granos con menores temperaturas, humedad relativa y niveles de radiación solar que en aquellos sembrados en fechas tempranas (Mathioni et al., 2006). En Argentina, los cultivos de soja sembrados más tarde, en general, presentan mayores daños por causa del TFC. La enfermedad es entonces favorecida debido a que el cultivo en sus últimas etapas fenológicas coincide con temperaturas moderadas (23 °C - 27 °C), mayores frecuencias de precipitaciones y un incremento en la cantidad de días con elevada humedad relativa (50 % - 100 %).

Las VB isothermalidad (BIO3), precipitaciones (mm) del mes de enero (Pre01) y de marzo (Pre03), tuvieron la mayor contribución sobre la probabilidad de una I mayor o igual al 50 % de la MPS (PIMPS $\geq 50$ ). Además, la radiación en el mes de marzo ( $R_{03}$ ) tuvo una contribución importante (25,4 %) sobre la PIMPS $\geq 50\%$  en el promedio de ambos años en comparación con el efecto de esta VB sobre el TFC. Esta contribución de la radiación sobre la MPS fue inesperada y, ya que por investigaciones previas del efecto del ambiente sobre la MPS y el TFC 27 °C, era de esperar que la radiación presentara mayor relación con el TFC que con la MPS. Es importante un estudio más exhaustivo entre la radiación y ambas enfermedades.

En Argentina observaron que la IMPS en el N de la provincia de Buenos Aires no presentó grandes incrementos cuando las semillas fueron sometidas a un largo período de lluvias durante los meses de marzo, abril y mayo

(Lavilla et al., 2021). Sin embargo, se incrementó la incidencia de otros hongos, tales como *Phomopsis* spp., *Fusarium* spp. y *Alternaria* spp. Esto coincide con los resultados obtenidos, en los cuales las precipitaciones en el mes de marzo presentaron una pendiente positiva en el aumento de la IMPS, pero su tasa de incremento fue muy baja (pendiente:  $4,7 \times 10^{-3}$ ).

En este estudio solo se evaluó la relación entre las variables bioclimáticas (VB) con el TFC y la MPS, con base en los datos publicados en Worldclim entre los años 1970 al 2000 (Fick & Hijmans, 2017). Sin embargo, pueden realizarse otros estudios con la base de datos disponibles en Worldclim. El programa Worldclim permite predecir la evolución de una enfermedad frente al cambio climático (Kumar Shukla et al., 2020). Este estudio podría realizarse para el TFC y la MPS, sin embargo, el sentido de este análisis es relativo y no sería representativo; en el futuro no se sabe cuál será la constitución genética de los cultivares de soja que se siembren en la Argentina.

Este es el primer estudio en donde se relacionan la probabilidad de una severidad del TFC ( $PSEVTFC \geq 90\%$ ) y la probabilidad de la incidencia mayor o igual al 50 % de la MPS ( $PIMPS \geq 50\%$ ) con las VB precipitaciones, temperatura y radiación en conjunto. Es relevante destacar que este estudio se pudo realizar porque la distribución de *C. kikuchii*, no sería afectada por los genotipos de los cultivares de soja, ya que todos son también susceptibles al patógeno (Lavilla et al., 2022b). La difusión o dispersión del patógeno depende en su mayoría de las variables bioclimáticas (VB). La información obtenida remarca la importancia que estas variables sobre los niveles de severidad del TFC e incidencia de la MPS. Las relaciones entre estas VB y las enfermedades merecen ser estudiadas e identificadas, a lo largo de los próximos años.

## Conclusiones

Las variables bioclimáticas temperaturas (entre los 25 °C y los 30 °C) y las precipitaciones entre los meses de diciembre a abril tuvieron las mayores asociaciones con los valores de severidad mayor o igual al 90 % del tizón foliar por *Cercospora* (TFC) y/o de incidencia mayor o igual al 50 % de la mancha púrpura de la semilla (MPS) en Argentina.

## Referencias

- Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J. L., Kelling, S., Phillips, T. B., Rosenberg, K. V., & Shirk, J. L. (2009). Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy. *BioScience*, 59(11), 977–984. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>
- Byass, P. (2009). Epidemiology without borders: an anational view of global health. *Global Health Action*, 2(1), Article 2052. <https://doi.org/10.3402/gha.v2i0.2052>
- Carmona, M. A., Moschini, R. C., Cazenave, G. R., & Sautua, F. (2010). Relación entre la precipitación registrada en estados reproductivos de la soja y la severidad de *Septoria glycines* y *Cercospora kikuchii*. *Tropical Plant Pathology*, 35(2), 71–78. <https://doi.org/10.1590/s1982-56762010000200001>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2011). *Infostat - Software estadístico* (versión 2011). Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=15>
- Elith, J., Phillips, S., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2010). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Fehr, W. R., Caviness, C. E., Burmood, D. T., & Pennington, J. S. (1971). Stage of Development Descriptions for Soybeans, *Glycine Max* (L.) Merrill 1. *Crop Science*, 11(6), 929–931. <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183x001100060051x>

- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Hartman, G. L., Rupe, J. C., Sikora, E. J., Domier, L. L., Davis, J. A., & Steffey, K. L. (2015). *Compendium of soybean diseases and pests* (5<sup>th</sup> ed.). American Phytopathological Society. <https://doi.org/10.1094/9780890544754>
- Kantolic, A. G., Mercu, J. L., Slafer, G. A., & Sadras, V. O. (2007). Simulated yield advantages of extending post-flowering development at the expense of a shorter pre-flowering development in soybean. *Field Crops Research*, 101(3), 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.12.008>
- Kumar Shukla, P., Baradevanal, G., Rajan, S., & Fatima, T. (2020). MaxEnt prediction for potential risk of mango wilt caused by *Ceratocystis fimbriata* Ellis and Halst under different climate change scenarios in India. *Journal of Plant Pathology*, 102(3), 765–773. <https://doi.org/10.1007/s42161-020-00502-9>
- Lavilla, M., & Ivancovich, A. (2021). Relación entre enfermedades y rendimiento de granos de soja. *Agronomía Mesoamericana*, 32(2), 479–486. <http://doi.org/10.15517/am.v32i2.44057>
- Lavilla, M., Ivancovich, A., & Díaz-Paleo, A. (2021). Evaluación del tizón foliar y la mancha púrpura en semilla de soja en Argentina. *Agronomía Mesoamericana*, 32(2), 619–628. <http://doi.org/10.15517/am.v32i2.43359>
- Lavilla, M., Ivancovich, A., & Díaz-Paleo, A. (2022a). Diagrammatic scale for assessment the severity of *Cercospora* leaf blight on soybean (*Glycine max*) leaflets. *Agronomía Mesoamericana*, 33(1), Artículo 43338. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.43338>
- Lavilla, M., Ivancovich, A., & Díaz-Paleo, A. (2022b). Tizón Foliar y la Mancha Púrpura de la semilla causados por *Cercospora kikuchii* en soja (*Glycine max* L. Merr.). *Agronomía Mesoamericana*, 33(1), Artículo 48494. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.48494>
- Mathioni, S. M., de Carvalho, S. V., Regiane Brunelli, K., Beló, A., & Aranha Camargo, L. E. (2006). Aggressiveness between genetic groups I and II of isolates of *Cercospora zea-maydis*. *Scientia Agricola*, 63(6), 547–551. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162006000600006>
- Panagopoulos, I., Bornman, J. F., & Björn, L. (1992). Response of sugar beet plants to ultraviolet-B (280–320 nm) radiation and *Cercospora* leaf spot disease. *Physiologia Plantarum*, 84(1), 140–145. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08776.x>
- Pei, Y. L., Shi, T., Li, C. P., Liu, X. B., Cai, J. M., & Huang, G. X. (2014). Distribution and pathogen identification of cassava brown leaf spot in China. *Genetics and Molecular Research*, 13(2), 3461–3473. <https://doi.org/10.4238/2014.april.30.7>
- Phillips, S., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161–175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Phillips, S., Anderson, R. H., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- QGIS. (2023). *Geographic Information System*. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Soberón, J., & Peterson, A. T. (2004). Biodiversity informatics: managing and applying primary biodiversity data. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 359(1444), 689–698. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1439>
- Upchurch, R. G., Walker, D. C., Rollins, J. A., Ehrenschaft, M., & Daub, M. E. (1991). Mutants of *Cercospora kikuchii* Altered in Cercosporin Synthesis and Pathogenicity. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(10), 2940–2945. <https://doi.org/10.1128/aem.57.10.2940-2945.1991>