

## Desarrollo e implementación de un sistema para detección temprana de enfermedades en vid en entorno R

M. Ausín Martín<sup>1</sup>, M. Rodrigues Mimbbrero<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Investigadora independiente

<sup>2</sup> Departamento de Geografía y Ordenación del territorio, IUCA, Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50.001 Zaragoza.

maialen.ausin@gmail.com, rmarcos@unizar.es

**RESUMEN:** Las crecientes exigencias del mercado están dando lugar a sistemas de producción alternativos orientados a una producción sostenible y eficaz, sistemas entre los que se encuentra la agricultura de precisión. La agricultura de precisión es un concepto agronómico de gestión basado en la existencia de una importante variabilidad espacial a diversas escalas tanto intra- como inter-parcela. Las Tecnologías de la Información Geográfica se configuran hoy en día como herramientas de potencial utilidad para la agricultura de precisión, ya que permiten la recolección, almacenamiento, análisis, procesamiento y presentación de información espacial. En este contexto, las aplicaciones y herramientas *open source* como R juegan un papel destacado dado su potencial para penetrar en el mercado y su versatilidad y capacidad de adaptación a distintos ámbitos de aplicación.

En este trabajo se desarrolla y presenta un sistema para la detección de enfermedades en cultivos de vid, aplicado al caso concreto de la afección/enfermedad Mildiu (hongo *Plasmopara viticola*), enfermedad muy conocida por los viticultores debido a los graves daños que ocasiona en el viñedo. El sistema propuesto se basa en el modelo Goidanich, basado en información meteorológica (temperatura media y humedad relativa), que permite conocer cuándo se producirá la fructificación asexual del hongo, momento idóneo para tratar la vid con productos de contacto que impidan la germinación de zoosporas. El sistema posibilita la detección y seguimiento del desarrollo de la enfermedad, reduciendo el número de tratamientos fitosanitarios necesarios, incrementando por tanto la eficiencia en la gestión del cultivo.

El sistema se ha implementado siguiendo una aproximación modular en la que inicialmente se calcula el grado de crecimiento del hongo a partir de información registrada en estaciones meteorológicas (Módulo 1). A continuación se espacializa para todo el área de estudio el valor de crecimiento obtenido en las distintas estaciones a través de modelos geoestadísticos (Módulo 2). Finalmente se publican los resultados en un visualizador cartográfico online (Módulo 3). Todos los módulos se han desarrollado en lenguaje R a través de distintos paquetes de análisis estadístico, espacial (*raster*, *maptools*, *rgdal* y *autoKrige*) y *webmapping* (*leafletR*).

El modelo se ha diseñado de modo que permita realizar el seguimiento utilizando datos meteorológicos históricos o actuales, siendo también posible efectuar predicciones a corto plazo a partir de predicciones meteorológicas. Actualmente se encuentran disponibles los resultados obtenidos para la modelización de la primera semana de mayo de 2014 en La Rioja ([http://155.210.62.105/mildiu\\_leaf/mildiu.html](http://155.210.62.105/mildiu_leaf/mildiu.html)).

**Palabras-clave:** Mildiu, Goidanich, R, Leaflet, geoestadística, TIG.

### 1. INTRODUCCIÓN

La viticultura se ha caracterizado históricamente por obtener un producto de alta calidad. Esto ha sido posible gracias a una serie de factores: la selección de zonas edafoclimáticas adecuadas, el patrimonio vitícola y varietal existente y, obviamente, el trabajo del viticultor en la gestión del día a día de los viñedos. No obstante, las exigencias crecientes del mercado, así como una normativa cada vez más rigurosa, están dando lugar a sistemas de producción alternativos al convencional adoptando técnicas de producción sostenibles y eficaces. En este contexto de innovación aparece el término de agricultura de precisión.

La agricultura de precisión se puede definir como concepto agronómico de gestión de parcelas agrícolas, basado en la existencia de una importante variabilidad espacial a nivel de campo. Requiere del uso de varias herramientas tecnológicas entre las cuales destacan los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS),

los sensores remotos, imágenes aéreas y/o satelitales, junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar, evaluar y entender dichas variaciones (Villalobos et al., 2009). Por tanto, para la agricultura de precisión, las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) se configuran como herramientas de potencial utilidad, ya que permiten la recolección, almacenamiento, análisis y procesamiento de información georreferenciada, en este caso de un campo o cultivo definido.

Tradicionalmente, las prácticas vitícolas se han realizado en los viñedos de una manera uniforme, aplicando la misma intensidad en operaciones como la poda, la fertilización, los tratamientos fitosanitarios, el riego etc., independientemente de la ubicación exacta dentro del viñedo (Arnó et al., 2009). Durante la última década, el desarrollo de sensores y monitores de rendimiento, así como la disponibilidad de imágenes de satélite de alta resolución espacial (entre 1,85 y 3,2 m/píxel) y/o de imágenes adquiridas desde aviones con cámaras multiespectrales (0,2 a 0,5 m/píxel) han puesto en manifiesto que puede existir una gran variabilidad intraparcelaria. Esta variabilidad repercute en la calidad de la uva y en la rentabilidad de la bodega, siendo, por tanto, la identificación y la caracterización de dicha variabilidad, su interpretación así como la posibilidad del manejo diferencial de dicha variabilidad, principal objetivo de la Viticultura de Precisión (VP) (Urretavizcaya et al., 2014)

El modelado de enfermedades se ha convertido en una necesidad para las tareas de prevención en agricultura, evitando así grandes pérdidas en la cosecha (Kuflik et al., 2009). Con los años, se han desarrollado diversos modelos de detección y seguimiento de enfermedades, principalmente con el objetivo de reducir el uso de fungicidas en el manejo integrado de plagas de Mildiu (Lomas, 1970; Muckensturm et al., 1990; Orlandini et al., 1993; Park et al., 1997; Salinari et al., 2007); sin embargo, un sistema de soporte de decisiones para la gestión de Mildiu en la viticultura orgánica aún no se ha implementado (Kuflik et al., 2009).

Tanto los SIG como la teledetección son una fuente de información valiosa para la gestión del viñedo. No sólo permiten el almacenamiento de una elevada cantidad de datos adquiridos en campo y de sensores remotos, sino que también permiten relacionar la información, aumentar el conocimiento sobre el comportamiento del cultivo y ver la evolución temporal de diferentes variables de interés relacionadas con el desarrollo de la viña como vigor vegetativo, LAI, enfermedades, malas hierbas, etc. (Casterad et al., 2006). Concretamente, los SIG permiten gestionar la información de la parcela seleccionada, realizar consultas rápidas sobre la información de la base de datos y representar gráficamente estos datos espaciales mediante cartografía descriptiva. Esto permite crear mapas temáticos que reflejen los aspectos más relevantes del viñedo, como el tipo de uva de cada parcela, superficie, régimen hídrico o marco de plantación. Son, además, una poderosa herramienta para estudiar la distribución de una determinada enfermedad en el viñedo y predecir el riesgo de presencia de la misma; así mismo, se consideran excelentes aliados para la focalización de acciones de prevención y control. De hecho, actualmente, las líneas de investigación para el desarrollo y la mejora en la agricultura de precisión para la gestión de los viñedos están orientadas a la realización de mapas de alta resolución (2 m) para las zonas vitícolas que permitan el seguimiento de la aplicación de pesticidas, evaluación de costes y georreferenciación de cada cepa.

Así pues, las TIG se configuran hoy en día como herramientas de potencial utilidad para la agricultura de precisión, ya que permiten la recolección, almacenamiento, análisis, procesamiento y presentación de información espacial. En este contexto, las aplicaciones y herramientas *open source* como R juegan un papel destacado dado su potencial para penetrar en el mercado y su versatilidad y capacidad de adaptación a distintos ámbitos de aplicación. A esto hay que añadir el desarrollo de lenguajes de programación y desarrollo web, que en los últimos años están jugando un papel fundamental en el desarrollo y acceso a la información. De hecho, según Rodríguez Pérez et al. (2003), el futuro para la gestión de los viñedos está en la generación de cartografía accesible por Internet, con actualización diaria para aviso de plagas y enfermedades, recomendaciones para programar la vendimia, entre otros.

En este trabajo se desarrolla y presenta un sistema para la detección de enfermedades en cultivos de vid aplicado al caso concreto de la afección/enfermedad Mildiu (hongo *Plasmopara viticola*), conocida debido a los graves daños que ocasiona en el viñedo. El sistema propuesto se basa en el modelo Goidanich (1959), basado en información meteorológica (temperatura media y humedad relativa), que permite conocer cuándo se producirá la fructificación asexual del hongo, momento idóneo para tratar la vid con productos de contacto que impidan la germinación de zoosporas. El sistema, basado en herramientas de modelado espacial en entorno R (R Development Team, 2011), posibilita la detección y seguimiento del desarrollo de la enfermedad reduciendo el número de tratamientos fitosanitarios necesarios, incrementando por tanto la eficiencia en la gestión del cultivo.

## 2. ENFERMEDADES EN LA VID

Los SIG ofrecen infinidad de posibilidades a la hora de obtener información interesante acerca de la gestión del viñedo. Una de las aplicaciones que puede ser de gran utilidad es la asociada con la salud de la vid. En muchas ocasiones, dependiendo de las condiciones meteorológicas del año, un viñedo, sólo por estar sano, ya es un buen viñedo. El agricultor que tiene un viñedo sano tiene mejores expectativas de venta que aquel que ha sido víctima de algún evento meteorológico extremo. Este mismo razonamiento puede aplicarse al desarrollo de algunas enfermedades de la vid, como es el caso del Mildiu, una de las peores enfermedades de la vid, aunque controlable mediante el tratamiento adecuado. Para ello, es de vital importancia conocer el estado de desarrollo del hongo causante de la enfermedad y así poder elegir el producto y el momento de aplicación.

Existen modelos de predicción que estudian la evolución del hongo con el fin de prever las infecciones. Estos modelos utilizan variables meteorológicas como la temperatura, la lluvia y la humedad relativa. A partir de esa información, obtenida generalmente a partir de mediciones en estaciones meteorológicas, se pueden derivar mapas de infección de Mildiu.

A este respecto, las Estaciones de Avisos Agrícolas llevan años asesorando a viticultores sobre el momento apropiado para tratar la enfermedad. No obstante, los avances tecnológicos permiten hoy en día disponer de estaciones más sencillas a un coste razonable, posibilitando una monitorización más exhaustiva del proceso de infección. Un caso específico de esto es el servicio agrometeorológico de RuralCat (<http://www.ruralcat.net/web/guest/agrometeo>), que ofrece la posibilidad de calcular las fases de desarrollo de la enfermedad de Mildiu en viña, del 1 de abril al 31 de agosto, a partir de un algoritmo basado en el modelo Goidanich. La cartografía o información espacial derivada de estos modelos, puede resultar de gran ayuda, siendo un paso adelante en la toma de decisiones acerca del producto a utilizar y del momento idónea para el tratamiento o también para reducir el número de tratamientos al mínimo indispensable.

El Mildiu es una enfermedad fúngica producida por un hongo ficomicetes llamado *Plasmopara viticola*. Se trata de una enfermedad muy conocida por los viticultores debido a los graves daños que ocasiona en el viñedo. Si las condiciones climáticas le son favorables afecta a todos los órganos verdes de la vid, llegando a causar pérdidas de hasta el 50% de la cosecha. No obstante, actualmente el riesgo de pérdidas está disminuyendo, ya que existe un mejor conocimiento de su biología, mejores productos sistémicos y penetrantes, y mejor preparación por parte de los propios viticultores.

El Mildiu afecta a todos los órganos verdes de la cepa. En el haz de las hojas aparecen unas manchas oleosas que se corresponden en el envés con una pelusilla blanca, que constituye la fructificación asexual del hongo. Al final del ciclo vegetativo, estas manchas adquieren forma de mosaico, ya que se da un crecimiento interno del micelio que queda limitado por los nervios de las hojas (Figura 1). En los racimos, el periodo de floración-cujado es el más peligroso. Cuando se aproxima la floración, el hongo actúa curvando los racimos infectados en forma de “S”, secando los botones florales y oscureciendo el raquis o raspajo. Si, además, el tiempo es húmedo, se recubre de una pelusilla blanquecina ocurriendo lo mismo en flores y granos recién cuajados. Cuando los granos superan el tamaño de un guisante, las bayas de los racimos afectados se oscurecen y se arrugan hasta su desecación obteniendo la denominación de “Mildiu larvado” (Figura 2).



**Figura 1.** Izquierda: síntoma inicial en el haz de la hoja. Centro: fructificación en el envés. Derecha: mosaico en la vid.

El Mildiu es un hongo endoparásito –ocupa los espacios intercelulares de los tejidos– que pasa el invierno en forma de oospora en los restos vegetales del suelo; por este motivo es importante eliminar los restos de la poda. Estas oosporas maduran en el invierno en función de las temperaturas y de las

precipitaciones, considerándose como favorables a su maduración los inviernos suaves y lluviosos mientras que los periodos secos son desfavorables. Su ciclo biológico se desarrolla en 4 fases: fase de contaminación, fase de incubación, fase de esporulación y fase de propagación.

En primavera, al darse ciertas condiciones ambientales (terreno con humedad suficiente, temperaturas superiores a 12°C y 1-2 días de precipitaciones de al menos 10 mm) comienza la germinación de los conidios que contienen las zoosporas móviles. Éstas se depositarán sobre los órganos verdes de las cepas y penetrarán en el interior de las hojas a través de las estomas, produciéndose la contaminación primaria.

En la fase de incubación, el micelio se extiende hasta culminar su desarrollo, momento en el que aparecen las manchas aceitosas en el haz de las hojas y la fructificación blanquecina en el envés de las mimas. La aparición de estos síntomas externos puede tardar entre 4 y 21 días desde el momento de la infección primaria en función de la humedad relativa y la temperatura.

En la fase de esporulación, se produce la fructificación asexual, en la cual los conidióforos producen los conidios necesarios para la propagación del hongo durante el periodo vegetativo del cultivo.

En la fase de propagación, los conidios son transportados por la lluvia o el viento a nuevas hojas no infectadas, donde, si las condiciones son propicias, puede dar lugar a contaminaciones secundarias. La presencia de más de dos horas de agua de rocío es suficiente para que se den estas contaminaciones; en esta situación la distribución será más local pero podrán extenderse en los sucesivos ciclos. Las condiciones óptimas de propagación son las lluvias nocturnas o al amanecer, con temperaturas entre 20 y 25°C.



Figura 2. Mildiu larvado

### 3. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DE PARTIDA

#### 3.1. Área de estudio

El área seleccionada para el estudio piloto del sistema es la Comunidad Autónoma de La Rioja (Figura 3). Esta comunidad, reconocida a nivel mundial por su producción vitivinícola, cuenta además con una red de estaciones meteorológicas distribuida regularmente en el territorio (en relación con la situación de las tierras de cultivo de vid) que ofrece información relativa a las variables meteorológicas necesarias para la implementación y aplicación del algoritmo.

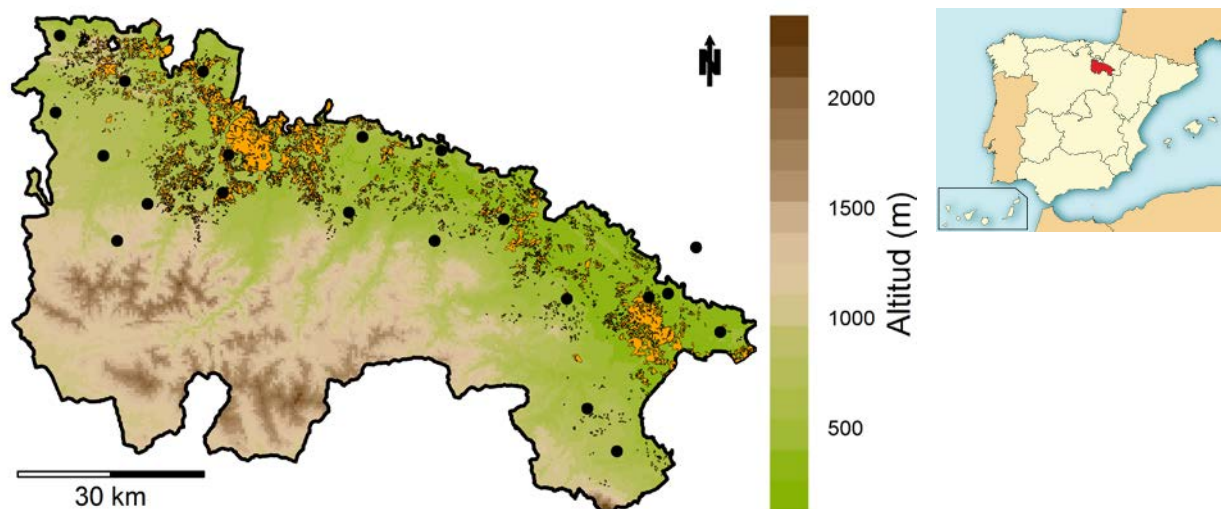


Figura 3. Izquierda: área de estudio. Localización de estaciones agrometeorológicas (puntos negros) y parcelas según SIOSE (naranja). Derecha: mapa de localización de la Comunidad Autónoma de La Rioja.

### 3.2. Datos de entrada del modelo

El modelo propuesto para el seguimiento del crecimiento del Mildiu requiere, como entrada principal, información meteorológica espacialmente distribuida referente a la temperatura y humedad relativa media diaria. Esta información se ha obtenido del Servicio de Información Agroclimática (SIAR - <http://www.larioja.org/siar>). El SIAR comprende una red de estaciones agrometeorológicas distribuidas por la superficie agraria de La Rioja con el objetivo de ayudar a los agricultores para conseguir un uso eficiente y racional de los medios de producción de los cultivos. Este servicio se actualiza hora a hora, por lo que es posible obtener la información requerida con la resolución temporal necesaria. Además provee también datos meteorológicos históricos, por lo que se podría llevar a cabo el proceso de validación a partir de esta fuente. Por otra parte, dado que cada estación se encuentra localizada mediante coordenadas UTM (EPSG 25830, Proyección UTM ETRS89 Huso 30 N), la espacialización de la red de estaciones meteorológicas se lleva a cabo también a partir de esta fuente de información. No obstante, dado que a la información meteorológica se accede mediante consulta personalizada a través de una interfaz web en PHP, no ha sido posible automatizar la descarga de las variables meteorológicas, por lo que el proceso de obtención de datos diarios debe realizarse manualmente.

Para cada estación meteorológica el modelo necesita un fichero de texto delimitado (*csv*) en el que aparezcan las mediciones de temperatura y humedad en columnas separadas. Cada fila recogerá información de las mediciones en días sucesivos. Finalmente, dado que la presentación final de los resultados de crecimiento se realiza a escala de parcela, es necesaria una capa de información vectorial con la delimitación del parcelario de plantación de vid en el área de estudio. Ante la imposibilidad de obtener dicha información, se ha optado por utilizar los polígonos SIOSE correspondientes a cubiertas de suelo con presencia de cultivo de vid (Instituto Geográfico Nacional – IGN/CNIG).

## 4. METODOLOGÍA

El sistema se ha implementado siguiendo una aproximación modular en la que inicialmente se calcula el grado de crecimiento del hongo a partir de información registrada en estaciones meteorológicas (Módulo 1). A continuación se espacializa para todo el área de estudio el valor de crecimiento obtenido en las distintas estaciones a través de modelos geoestadísticos (Módulo 2). Finalmente se publican los resultados en un visualizador cartográfico online (Módulo 3). Todos los módulos se han desarrollado en lenguaje R a través de distintos paquetes de análisis estadístico, espacial (raster, mapproj, rgdal y autoKriging) y webmapping (leafletR, Graul, 2015).

El modelo se ha diseñado de modo que permita realizar el seguimiento utilizando datos meteorológicos históricos o actuales, siendo también posible efectuar simulaciones a corto plazo a partir de predicciones meteorológicas. Actualmente se encuentran disponibles los resultados obtenidos para la modelización de la primera semana de mayo de 2014 en La Rioja.

### 4.1. Módulo 1. Determinación del crecimiento del hongo

Como se ha indicado ya anteriormente, en este trabajo se va a utilizar el modelo de Goidanich, basado en la duración del periodo de incubación del hongo (Goidanich, 1959). Este modelo permite conocer el momento en el que se producirá la fructificación asexual, momento perfecto para tratar la vid con productos de contacto que impidan la germinación de zoosporas. Normalmente, el viticultor no tiene medios para saber el momento oportuno de tratamiento, debiéndose guiar por las indicaciones de la estación de Avisos Agrícolas más cercana, la cual alerta cuando el hongo ha alcanzado un 70-80% de desarrollo. De esta manera, se asegura que el viticultor tenga en su poder el aviso antes de cumplirse el 100% del desarrollo (López et al., 2009). Una vez se ha confirmado la primera infección (siendo vital el seguimiento por parte del viticultor para la detección de las primeras manchas), se puede seguir la evolución del hongo mediante el conocimiento de la temperatura media ( $T_m$ ), la humedad relativa media ( $H_m$ ) y la cantidad de lluvia. Goidanich desarrolló una tabla de evolución diaria de la infección en función de estos parámetros (Tabla 1). De esta manera, por cada  $T_m$  se fija un crecimiento diario del hongo según la  $H_m$  sea alta o baja (mayor o inferior al 7%, Barrios, G. y Reyes, J., 2004). Goidanich define que la  $H_m$  alta (>75%) corresponde a días nublados con diferencia térmica baja, a la vez que expresa como  $H_m$  media-baja la (<75%) la que se produce en días serenos con diferencia térmica alta (Barrios y Reyes, 2004).

Por tanto, el algoritmo desarrollado utiliza el modelo Goidanich para evaluar diariamente el grado de desarrollo del hongo en cada estación meteorológica del área de estudio, permitiendo así caracterizar no solo el crecimiento del hongo sino también el patrón espacial de su desarrollo. La Figura 4 presenta el diagrama



de flujo del algoritmo implementado en R. Cabe destacar en este punto que el modelo no solo permite la estimación del crecimiento para la región de estudio al completo, sino que, dado que el algoritmo se desarrolla mediante un proceso iterativo calculando el valor de crecimiento individualmente para cada estación meteorológica para después espacializar el resultado mediante interpolación (Módulo 2), es posible analizar la evolución del crecimiento *in situ* para una estación determinada. A este respecto se ha implementado una aplicación web, basada en el algoritmo descrito en la Figura 4, que permite analizar el crecimiento utilizando datos propios de una ubicación cualquiera (Figura 5). Esta aplicación se ha diseñado utilizando la plataforma *ShinyApps* desarrollado por el equipo de RStudio; se puede acceder a ella mediante la siguiente URL: <https://geoonline.shinyapps.io/mildiu/>. Se proporcionan datos de ejemplo de mayo de 2014 en algunas estaciones de La Rioja y Aragón disponibles en [http://155.210.62.105/mildiu\\_datos/](http://155.210.62.105/mildiu_datos/), concretamente para Alfaro (La Rioja) y Caspe (Zaragoza).

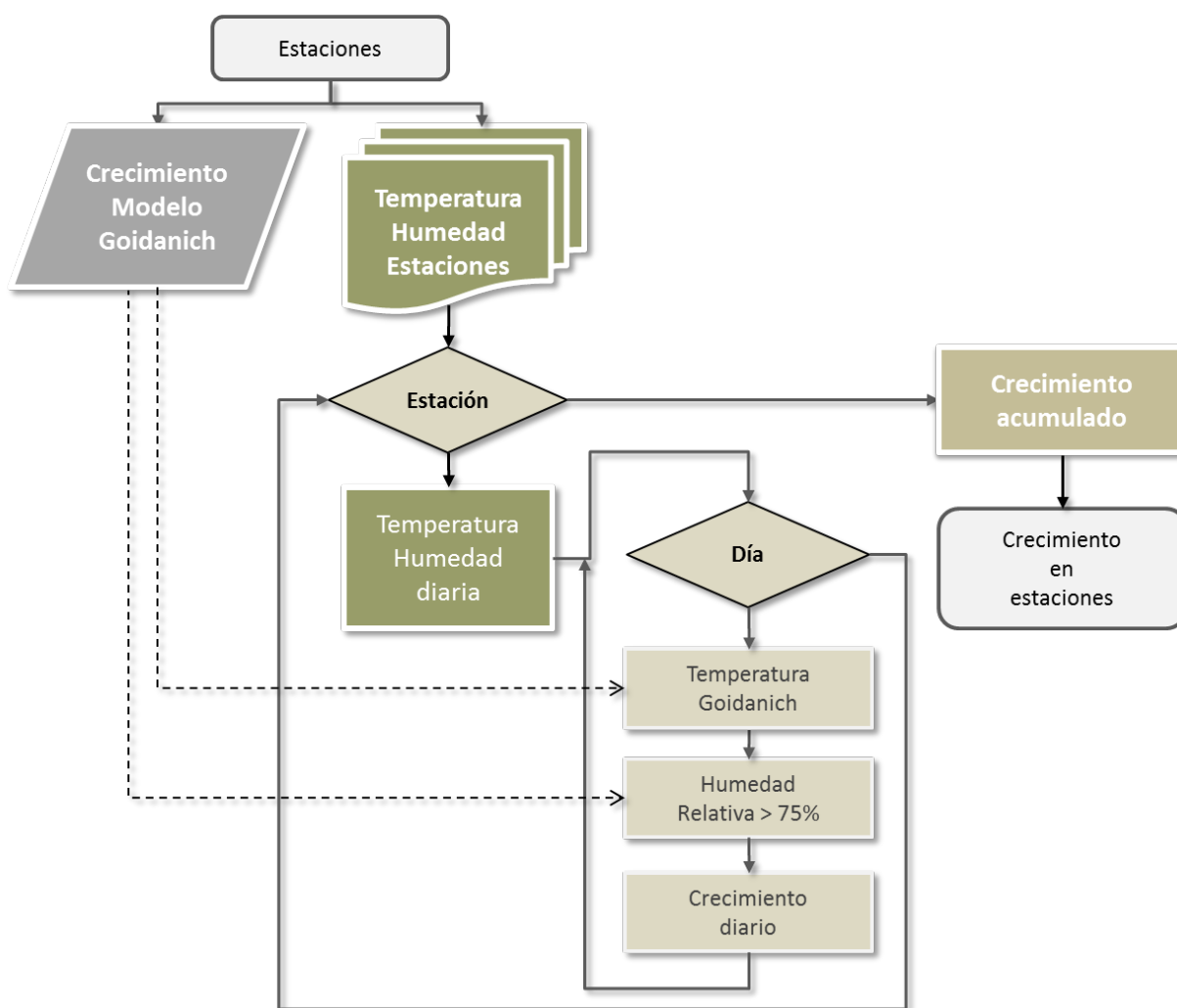
**Tabla 1.** Modelo de crecimiento del hongo *Plasmopara viticola* propuesto por Goidanich.

$T_m$ (°C)	$H_m < 75\%$	$H_m < 75\%$	$T_m$ (°C)	$H_m < 75\%$	$H_m < 75\%$	$T_m$ (°C)	$H_m < 75\%$	$H_m < 75\%$	
12,	00	0,00	17,	00	10	22,	00	16,60	
	25	4,40		25	10,30		25	17	22,60
	50	4,70		50	10,50		50	17,30	23,50
	75	5		75	10,75		75	17,70	24,40
13,	00	5,30	18,	00	11,10	23,	00	18,10	
	25	5,70		25	11,48		25	18,10	25
	50	6		50	11,70		50	18,10	25
	75	6,30		75	12,10		75	18,10	25
14,	00	6,6	19,	00	12,50	24,	00	18,10	
	25	6,8		25	12,90		25	17,70	24,30
	50	7,10		50	13,40		50	17,30	23,60
	75	7,30		75	13,70		75	16,60	23,20
15,	00	7,60	20,	00	14,20	25,	00	16,60	
	25	7,80		25	14,50		A partir de 25°C el desarrollo es constante		
	50	8,10		50	14,80				
	75	8,30		75	15				
16,	00	8,50	21,	00	15,30	A partir de 25°C el desarrollo es constante			
	25	9		25	15,70				
	50	9,30		50	16				
	75	9,60		75	16,30				

#### 4.2. Módulo 2. Espacialización del crecimiento del hongo

Una vez determinado el porcentaje de crecimiento en cada una de las estaciones meteorológicas dentro del área de estudio se procede a la espacialización del porcentaje de crecimiento. Este proceso consta de dos partes. En una primera aproximación se procede a la interpolación del grado de crecimiento utilizando técnicas geostatísticas. Concretamente se utiliza el método *Ordinary Kriging* (paquete *autoKrige*) para crear una superficie continua de crecimiento (con una resolución espacial de 250 m. Figura 6). A continuación se agrega el crecimiento a escala de parcela mediante el cálculo de las estadísticas zonales, para así determinar el crecimiento concreto en cada una de las parcelas de cultivo de vid (aproximadas en este trabajo mediante la cartografía de SIOSE).

Este proceso permite obtener por una parte una capa ráster de crecimiento (disponible en diversos formatos: *Geotiff*, *ERDAS imaging*, *ESRI GRID* o *ASCII*) y una capa vectorial (creada inicialmente en formato *ESRI Shapefile*, posteriormente transformada a formato *GeoJSON*) con la información estadística sobre el grado de crecimiento procedente de las estadísticas zonales. Además, dado que la información sobre crecimiento se obtiene diariamente, la capa vectorial resultante puede almacenar la evolución diaria, si se deseara.

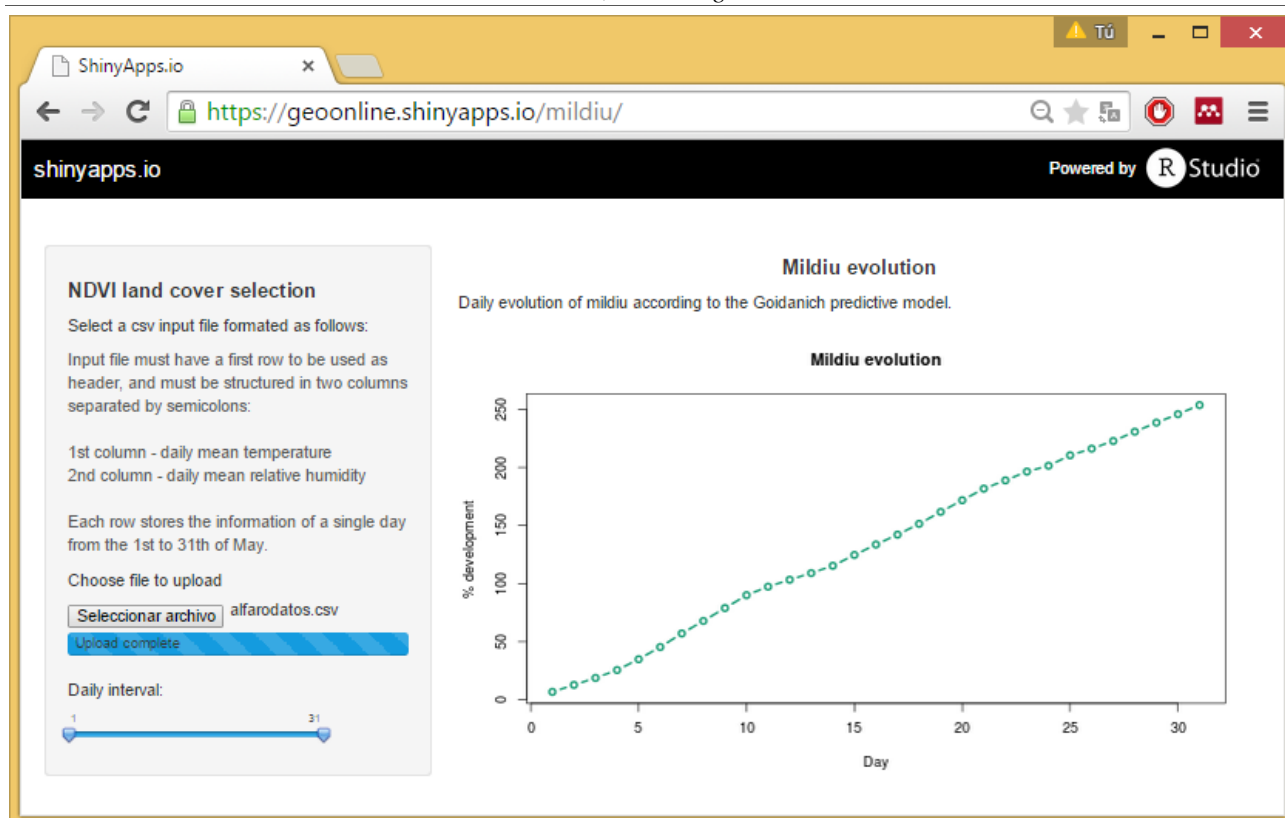


**Figura 4.** Diagrama de flujo del módulo para el cálculo del crecimiento de Mildiu.

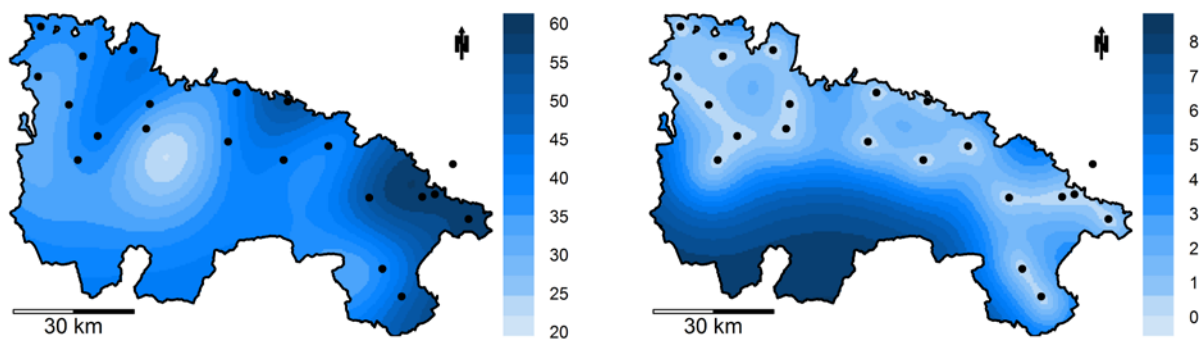
### 4.3. Módulo 2. Publicación de resultados

Finalmente, la información generada por el algoritmo de crecimiento, especializada para obtener datos a nivel de parcela, se publica mediante la creación de un visualizador cartográfico online. Este último paso, también implementado en entorno R utilizando el paquete *leafletR* (desarrollado por el equipo de RStudio al igual que *ShinyApps*), permite crear un cliente de visualización web basado en las librerías de JavaScript *Leaflet*. Esto implica llevar a cabo diversos procesos de manipulación de la información espacial obtenida como su conversión a formato *GeoJSON* (formato sencillo y ligero para la representación de información vectorial) y reproyección al sistema de referencia WGS84 (EPSG 4326), de modo que se minimicen los problemas de superposición con mapas base como *Open Street Map* (OSM).

El producto final es un cliente de visualización accesible utilizando cualquier navegador web ([http://155.210.62.105/mildiu\\_leaf/mildiu.html](http://155.210.62.105/mildiu_leaf/mildiu.html), Figura 7). En él se representa la información de crecimiento promedio a escala de parcela, mediante intervalos regulares y utilizando una gama de color de tres tonos. En la Figura 7 se presenta la evolución del crecimiento durante los primeros 8 días de mayo de 2014. Como se puede observar, durante los primeros 5 días el desarrollo del hongo es prácticamente nulo, debido a que la temperatura media apenas supera el umbral de los 12°C en la mayoría de estaciones. A partir del 5 de mayo, el aumento repentino de la temperatura, junto con el incremento de la humedad relativa, acelera el desarrollo de la afección, llegando a valores cercanos al 70% en los alrededores de Alfaro (zona sureste), umbral a partir del cual se puede iniciar el tratamiento fitosanitario de la vid.



**Figura 5.** Interfaz web *ShinyApps*. Evolución del Mildiu 01/05/2014-31/05/2014 en la estación meteorológica de Alfaro.



**Figura 6.** Izquierda: porcentaje de crecimiento interpolado mediante *Ordinary Kriging* (01/05/2014-07/05/2104). Derecha: porcentaje de error en la interpolación.



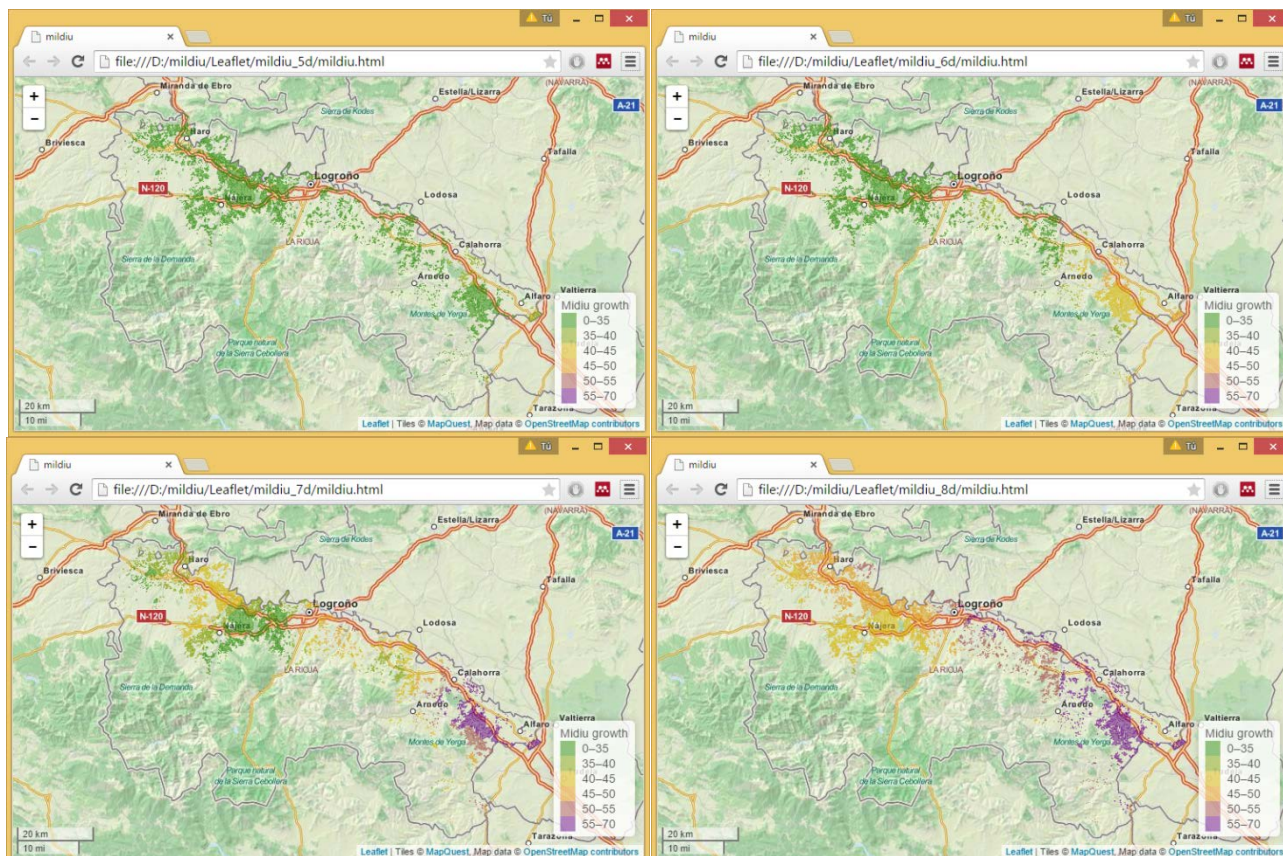


Figura 7. Evolución del Mildiu 05/05/2014-08/05/2014. Ordenado de izquierda a derecha y de arriba a abajo.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La modelización del crecimiento de enfermedades supone un avance para la agricultura en la actualidad, dado que facilita la labor de los agricultores ya sea por evitar un excesivo uso de fitosanitarios y, en consecuencia, un desmedido desembolso de dinero, así como por facilitar la localización de las parcelas infectadas. En este sentido, las TIG suponen un avance significativo dentro del campo de la gestión agrícola y particularmente en la agricultura de precisión, dada su capacidad para analizar patrones espaciales y modelar y realizar simulaciones basadas en información espacial de índole diversa.

En este trabajo se presenta un modelo para la monitorización de la evolución del hongo *Plasmopara viticola*, más conocido como Mildiu. El modelo propuesto, basado íntegramente en herramientas *Open Source*, permite llevar a cabo el seguimiento del crecimiento a partir de datos sobre temperatura y humedad relativa media diaria según el modelo Goidanich. Este modelo permite realizar el seguimiento de la afección del hongo tanto a escala local (parcela o estación meteorológica) como regional (mediante la espacialización de mediciones locales).

El modelo propuesto combina lenguajes de programación (R/html) con herramientas geoestadísticas (*Kriging*) y cartográficas (*Leaflet*) para proporcionar una herramienta sencilla que permita evaluar rápidamente la situación de la enfermedad y, en consecuencia, tomar decisiones en base a esos resultados.

No obstante, el modelo es susceptible de mejora en tanto en cuanto se trata de una herramienta piloto. Por una parte es necesario automatizar la obtención de los datos meteorológicos de partida, de modo que no sea necesario introducirlos manualmente. Por otra parte, no se dispone en este momento de una capa vectorial de parcelas de vid, sino que se utilizan los polígonos SIOSE. Finalmente, el resultado producido en este momento es un visualizador web que, si bien resulta útil, adolece de la necesidad de hacer una consulta explícita al mismo, teniendo que revisitarlo para conocer el grado de desarrollo de la afección y su evolución. La línea futura de desarrollo contempla la implementación de un sistema automático de aviso vía email, para lo que se requiere, además de información sobre la distribución de parcelas, información relativa al propietario de la misma. Otro posible futuro desarrollo o mejora del modelo pasa por la integración de

información procedente de observaciones mediante teledetección, de modo que la información meteorológica se obtenga a partir de estas fuentes (temperatura de superficie, humedad relativa). De este modo, se eliminaría la necesidad de realizar la interpolación del crecimiento ya que la información se encontraría ya espacialmente distribuida, aunque habría que considerar otros inconvenientes como por ejemplo cómo combinar de manera eficiente y consistente información procedente de diversos sensores, con distinta resolución espacial y/o periodo de revisita de la plataforma.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Arnó, J., Martínez-Casasnovas, J.A., Ribes-Dasi, M., Rosell, J.R. (2009): "Precision viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management". Spanish Journal of Agricultural Research, 7, 779-90.
- Barrios, G., Reyes, J. (2004): "Modelización del mildiu en la vid". Phytoma, 164.
- Casterad Seral, M.A., López Lozano, R., Acevedo Gómez, A. (2006): "Uso de técnicas SIG y teledetección en el seguimiento del cultivo de viña". Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. XII. 2006. Granada. 691-697.
- Goidanich, G. (1959): Manuale di Patologia Vegetale. Bologna, Edagricole, 713 pp.
- Kuflik, T., Prodoruttib, D., Frizzi, A., Gafnia, Y., Simona, S., Pertot, I. (2009): "Optimization of copper treatments in organic viticulture by using a web-based decision support system". Computers and Electronics in Agriculture 68 (2009), 36-43.
- Lomas, J. (1970): "An agrometeorological method of forecasting the appearance of grapevine downy mildew (*Plasmopara viticola*) in Israel". Israel J. Agric. Res., 20, 186.
- López, R., Rodríguez de Acuña, F., Trujillo, E., Perera, S. (2009): "Validación del modelo predictivo de Mildiu Goidanich en viña en cinco comarcas vitícolas de Tenerife." Campaña 2009, 9pp.
- Muckensturm, N., Magnien, C., Jacquin, D. (1990): "MILVIT, un nouveau modele de prevision des riques mildiou/ MILVIT, a new model for forecasting the risk of mildew". Phytoma, 419, 34-36.
- Orlandini, S., Gozzini, B., Rosa, M., Egger, E., Storchi, P., Maracchi, G., Miglietta, F. (1993): "PLASMO: a simulation model for control of *Plasmopara viticola* on grapevine". Bull. OEPP, 23, 619-626.
- Park, E.W., Seem, R.C., Gadoury, D.M., Pearson, R.C. (1997): "DMCAST: a prediction model for grape downy mildew development". Vitic. Enol. Sci., 52, 182-189.
- R Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing, ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Rodríguez Pérez, J.R., Álvarez Taboada, M.F., Cazón Seco, A.R. (2003): "Aplicación de los sistemas de información geográfica para la gestión vitícola: Aplicación en la denominación de Origen Bierzo". XIII ADM-XV INGEGRAF International Conference on Tools and Methods Evolution in Engineering Design.
- Salinari, F., Giosuè, S., Rossi, V., Tubiello, F.N., Rosenzweig, C., Gullino, M.L. (2007): "Downy mildew outbreaks on grapevine under climate change: elaboration and application of an empirical-statistical model". OEPP/EPPO Bull., 37, 317-326.
- Urretavizcaya, I., Santesteban, L.G., Tisseyre, B., Guillaume, S., Miranda, C., Royo, J.B. (2014): "Oenological significance of vineyard management zones delineated using early grape sampling". Precision Agriculture, 15, 111-29.
- Villalobos, P., Manríquez, R., Acevedo, C., Ortega, S. (2009): "Estudio del alcance de la agricultura de precisión en Chile: estado del arte, ámbito de aplicación y perspectivas". Departamento de economía agraria en colaboración con el centro de investigación y transferencia en riego y agroclimatología (CITRA), Universidad de Talca, Chile.