

SISTEMA, APARATO Y MÉTODO PARA DETERMINAR LOS VALORES REFINADOS DE NUTRIENTES DE PECÍOLO BASADOS EN LOS DATOS ESPECTRALES DE LAS HOJAS

CAMPO DE LA INVENCION

5 [0001] Este documento se relaciona con sistemas, aparatos, y métodos para determinar de los valores refinados de nutrientes de pecíolo basados en los datos espectrales de hojas a partir de hojas de plantas.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

10 [0002] Las plantas necesitan nutrientes para su crecimiento y sostenimiento. Por ejemplo, las plantas pueden necesitar macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), y azufre (S) en grandes cantidades. Las plantas también pueden necesitar micronutrientes como manganeso (Mn), zinc (Zn), hierro (Fe), sodio (Na), cobre (Cu), aluminio (Al), y boro (B) en pequeñas cantidades.

15 [0003] En aplicaciones agrícolas, el rendimiento y/o la calidad de cultivos cosechados puede verse afectada si las plantas del cultivo no reciben una cantidad adecuada de cada nutriente requerido. Por ejemplo, el rendimiento del cultivo y/o la calidad se pueden reducir si las plantas no reciben suficientes nutrientes. En algunos casos, el suministro excesivo de nutrientes también puede reducir el rendimiento del cultivo y/o la calidad.

20 [0004] Determinar el estado de valor de nutriente de las plantas puede permitir llevar a cabo acciones correctivas para mejorar el rendimiento y/o la calidad del cultivo. Por ejemplo, la composición y cantidad de fertilizante puede ser personalizada para uno o más nutrientes específicos con base en el estado de valor de nutriente determinado de las plantas.

BREVE DESCRIPCION DE LA INVENCION

25 [0005] Se proporciona la siguiente breve descripción para introducir al lector a la discusión más detallada a continuación. El resumen no pretende limitar o definir ninguna invención reivindicada o por reivindicar. Una o más invenciones pueden residir en cualquier combinación o sub-combinación de los elementos o pasos del proceso divulgados en alguna parte de este documento incluyendo sus reivindicaciones y figuras.

[0006] De acuerdo con algunos aspectos, se proporciona un método para determinar de forma no destructiva los valores de nutriente de pecíolo en tiempo casi real a partir de hojas

de planta en un campo de cultivo usando un espectrofotómetro portátil. El método puede comprender: (a) tomar medidas espectrales no destructivas de una hoja de una planta en el campo de cultivo usando el espectrofotómetro portátil para generar datos espectrales de hojas, (b) almacenar los datos espectrales de hojas en una memoria; (c) calcular, mediante
5 un procesador, los valores de nutrientes del pecíolo en base a los datos espectrales de la hoja almacenados; y (d) proporcionar un resultado casi en tiempo real que indica los valores de nutrientes del pecíolo.

[0007] De acuerdo con algunos aspectos, se proporciona un aparato para determinar de forma no destructiva los valores de nutrientes del pecíolo casi en tiempo real a partir de
10 hojas de plantas en un campo de cultivo. El aparato puede comprender: una memoria que almacena uno o más modelos de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo basadas en entradas de datos espectrales de hojas; y al menos un procesador acoplado comunicativamente con la memoria. El por lo menos un procesador puede configurarse para colectivamente: recibir datos espectrales de
15 hojas generados por un espectrofotómetro portátil basado en mediciones espectrales no destructivas de una hoja de una planta en el campo de cultivo; almacenar los datos espectrales de la hoja en la memoria; ingresar los datos espectrales de la hoja en el uno o más modelos de aprendizaje automático; recibir un resultado que comprenda los valores de nutrientes del pecíolo determinados por el uno o más modelos de aprendizaje automático
20 basados en los datos espectrales de la hoja; y proporcionar un resultado casi en tiempo real a un dispositivo móvil, el resultado casi en tiempo real indica los valores de nutrientes del pecíolo.

[0008] De acuerdo con algunos aspectos, se proporciona un medio legible por computador no transitorio que comprende instrucciones ejecutables por un procesador. Las
25 instrucciones, cuando se ejecutan, pueden configurar el procesador para: recibir datos espectrales de hojas generados por un espectrofotómetro portátil basado en mediciones espectrales no destructivas de una hoja de una planta en un campo de cultivo; almacenar los datos espectrales de la hoja en una memoria; ingresar los datos espectrales de la hoja en uno o más modelos de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valor de
30 nutrientes del pecíolo basados en las entradas de datos espectrales de la hoja; recibir un resultado que comprenda los valores de nutrientes del pecíolo determinados por el uno o más modelos de aprendizaje automático basados en los datos espectrales de la hoja; y proporcionar un resultado casi en tiempo real que indica los valores de nutrientes del pecíolo.

[0009] De acuerdo con algunos aspectos, se proporciona un sistema para determinar de forma no destructiva los valores de nutrientes del pecíolo casi en tiempo real a partir de hojas de plantas en un campo de cultivo. El sistema puede comprender un espectrofotómetro portátil y un servidor remoto. El espectrofotómetro portátil puede configurarse para: generar
5 datos espectrales de hojas basados en mediciones espectrales no destructivas de una hoja de una planta en el campo de cultivo; y transmitir los datos espectrales de la hoja para que los reciba el servidor remoto a través de una red. El servidor remoto puede comprender un procesador y una memoria, almacenando la memoria uno o más modelos de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo basadas
10 en entradas de datos espectrales de hojas. El servidor remoto puede configurarse para: recibir los datos espectrales de la hoja; almacenar los datos espectrales de la hoja en la memoria; ingresar los datos espectrales de la hoja en el uno o más modelos de aprendizaje automático; recibir los valores de nutrientes del pecíolo determinados por el uno o más modelos de aprendizaje automático basados en los datos espectrales de la hoja; y proporcionar un
15 resultado casi en tiempo real que indica los valores de nutrientes del pecíolo a un dispositivo móvil.

[0010] De acuerdo con algunos aspectos, se proporciona un método para determinar valores de nutrientes refinados del pecíolo basados en los datos espectrales de las hojas de plantas. El método puede comprender: (a) almacenar los datos espectrales de la hoja en una
20 memoria, (b) transformar, usando un procesador, los datos espectrales de la hoja en valores preliminares de nutrientes del pecíolo ingresando los datos espectrales de la hoja en uno o más modelos lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo basados en entradas de los datos espectrales de la hoja, el uno o más modelos lineales de aprendizaje automático dando salida a los valores preliminares
25 de nutrientes del pecíolo; (c) refinar, utilizando el procesador, los valores preliminares de nutrientes del pecíolo ingresando los valores preliminares de nutrientes del pecíolo en uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas refinadas de valores de nutrientes del pecíolo basados en entradas preliminares de valores de nutrientes del pecíolo, los uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático dando
30 salida a valores refinados de nutrientes del pecíolo; y (d) dar salida a un informe de nutrientes de la planta indicativo de los valores refinados de nutrientes del pecíolo.

[0011] De acuerdo con algunos aspectos, se proporciona un medio legible por computador no transitorio que comprende instrucciones ejecutables por un procesador. Las instrucciones cuando se ejecutan pueden configurar el procesador para: almacenar datos

espectrales de hojas de plantas en una memoria; transformar, utilizando el procesador, los datos espectrales de hojas en valores preliminares de nutrientes del pecíolo ingresando los datos espectrales de las hojas en uno o más modelos lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo basados en
5 entradas de los datos espectrales de las hojas; recibir una salida que comprende los valores preliminares de nutrientes del pecíolo de uno o más modelos lineales de aprendizaje automático; refinar, utilizando el procesador, los valores preliminares de nutrientes del pecíolo ingresando los valores preliminares de nutrientes del pecíolo en uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas refinadas de valores
10 de nutrientes del pecíolo basados en entradas preliminares de valores de nutrientes del pecíolo; recibir una salida que comprenda los valores refinados de nutrientes del pecíolo de uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático; y emitir un informe de nutrientes de la planta indicativo de los valores refinados de nutrientes del pecíolo.

[0012] De acuerdo con algunos aspectos, se proporciona un sistema para determinar
15 valores refinados de nutrientes del pecíolo basados en los datos espectrales de la hoja de la planta. El sistema puede comprender una memoria y un procesador. La memoria se puede configurar para almacenar datos espectrales de la hoja de las hojas de la planta. El procesador puede estar configurado para: transformar los datos espectrales de la hoja en valores preliminares de nutrientes del pecíolo ingresando los datos espectrales de la hoja en uno o
20 más modelos lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo basadas en entradas de los datos espectrales de la hoja; recibir una salida que comprenda los valores preliminares de nutrientes del pecíolo de uno o más modelos lineales de aprendizaje automático; refinar los valores preliminares de nutrientes del pecíolo ingresando los valores preliminares de nutrientes del pecíolo en uno o más
25 modelos no lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas refinadas de valores de nutrientes del pecíolo basados en entradas preliminares de valores de nutrientes del pecíolo; recibir una salida que comprenda los valores refinados de nutrientes del pecíolo de uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático; y emitir un informe de nutrientes de la planta indicativo de los valores refinados de nutrientes del pecíolo.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

[0013] Las figuras incluidas en este documento son para ilustrar varios ejemplos de artículos, métodos, y aparatos de la presente descripción y no pretenden limitar de ninguna manera el alcance de lo que se enseña. En las figuras:

[0014] La Figura 1 es una ilustración de una hoja de una planta cuyos valores de nutrientes pueden ser determinados, de acuerdo con una modalidad;

[0015] La Figura 2 es una ilustración esquemática de un sistema para determinar de forma no destructiva los valores de nutrientes de pecíolo en tiempo casi real a partir de hojas de planta en un campo de cultivo, de acuerdo con una modalidad;

[0016] La Figura 3 es una ilustración esquemática de un resultado que indica los valores de nutriente del pecíolo suministrado por el sistema de la Figura 2 y mostrado gráficamente en un dispositivo móvil;

[0017] La Figura 4 es una ilustración esquemática de un aparato para determinar de forma no destructiva los valores de nutriente de pecíolo en tiempo casi real a partir de hojas de planta en un campo de cultivo, de acuerdo con una modalidad;

[0018] La Figura 5 es un diagrama de flujo que ilustra un método de ejemplo para determinar de forma no destructiva los valores de nutriente de pecíolo en tiempo casi real a partir de hojas de planta en un campo de cultivo usando un espectrofotómetro portátil.

[0019] La Figura 6 es una tabla que ilustra las interrelaciones en las características de absorción de nutrientes de las plantas de papa de acuerdo con una modalidad; y

[0020] La Figura 7 es un diagrama de flujo que ilustra un método de ejemplo para determinar valores refinados de nutrientes del pecíolo basados en los datos espectrales de las hojas de las plantas.

20 **DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION**

[0021] Numerosas modalidades se describen en esta solicitud y se presentan solo con fines ilustrativos. Las modalidades descritas no pretenden ser limitativas en ningún sentido. La invención es ampliamente aplicable a numerosas modalidades, como es fácilmente evidente a partir de la presente descripción. Los expertos en la materia reconocerán que la presente invención se puede poner en práctica con modificaciones y alteraciones sin apartarse de las enseñanzas descritas en este documento. Aunque las características particulares de la presente invención pueden describirse con referencia a una o más modalidades o figuras particulares, debe entenderse que tales características no se limitan al uso en una o más modalidades o figuras particulares con referencia a las cuales se describen.

[0022] Los términos “una modalidad”, “modalidad”, “modalidades”, “la modalidad”, “las

modalidades”, “una o más modalidades”, “algunas modalidades” y “una modalidad” significan “uno o más (pero no todas) modalidades de la(s) presente(s) invención(es)”, a menos que se especifique expresamente lo contrario.

5 **[0023]** Los términos “incluido”, “que comprende” y variaciones de los mismos significan “incluido pero no limitado a”, a menos que se especifique lo contrario. Una lista de artículos no implica que alguno o todos los artículos sean mutuamente excluyentes, a menos que se especifique lo contrario. Los términos “un”, “una” y “el” significan “uno o más”, a menos que se especifique lo contrario.

10 **[0024]** Como se usa aquí y en las reivindicaciones, se dice que dos o más partes están “acopladas”, “conectadas”, “adjuntas”, “unidas”, “fijadas” o “sujetadas” cuando las partes se unen u operan juntas directamente o indirectamente (es decir, a través de una o más partes intermedias), siempre que se produzca un vínculo. Como se usa aquí y en las reivindicaciones, se dice que dos o más partes están “directamente acopladas”, “directamente conectadas”, “directamente unidas”, “directamente adjuntas”, “directamente fijadas” o “directamente
15 sujetadas” cuando las partes están conectadas en contacto físico entre sí. Como se usa en este documento, se dice que dos o más partes están “rígidamente acopladas”, “rígidamente conectadas”, “rígidamente adjuntas”, “rígidamente unidas”, “rígidamente fijadas” o “rígidamente sujetadas” cuando las partes están acopladas de manera que se mueven como una mientras mantienen una orientación constante entre sí. Ninguno de los términos
20 “acoplado”, “conectado”, “adjunto”, “unido”, “fijado” y “sujetado” distingue la forma en que se unen dos o más partes.

[0025] Además, aunque los pasos del método pueden describirse (en la descripción y/o en las reivindicaciones) en un orden secuencial, dichos métodos pueden configurarse para funcionar en órdenes alternos. En otras palabras, cualquier secuencia u orden de pasos que
25 pueda describirse no indica necesariamente un requisito de que los pasos se realicen en ese orden. Los pasos de los métodos descritos en este documento se pueden realizar en cualquier orden que sea práctico. Además, algunos pasos pueden realizarse simultáneamente.

[0026] Como se usa aquí y en las reivindicaciones, se dice que un grupo de elementos realizan 'colectivamente' un acto cuando ese acto lo realiza cualquiera de los elementos del
30 grupo, o lo realizan en cooperación dos o más (o todos) elementos del grupo.

[0027] Como se usa aquí y en las reivindicaciones, se dice que un primer elemento es “recibido” en un segundo elemento donde al menos una parte del primer elemento es recibida

en el segundo elemento a menos que se indique específicamente lo contrario.

[0028] Algunos elementos del presente documento pueden identificarse mediante un número de pieza, que se compone de un número base seguido de un sufijo alfabético o de subíndice numérico (por ejemplo, 112a o 112₁). Múltiples elementos aquí pueden ser identificados por números de parte que comparten un número base en común y que difieren por sus sufijos (por ejemplo, 112₁, 112₂ y 112₃). Se puede hacer referencia a todos los elementos con un número base común de forma colectiva o genérica utilizando el número base sin sufijo (por ejemplo, 112).

[0029] Como se usa en este documento y en las reivindicaciones, “arriba”, “abajo”, “encima”, “debajo”, “hacia arriba”, “vertical”, “elevación”, “superior”, “inferior” y términos similares se refieren a una direccionalidad generalmente alineada con (por ejemplo, paralela a) la gravedad. Los términos “distal”, “proximal” y términos similares se refieren a una direccionalidad generalmente que es transversal (por ejemplo, perpendicular) a la gravedad. Sin embargo, ninguno de los términos a los que se hace referencia en este párrafo implica una alineación particular entre los elementos. Por ejemplo, se puede decir que un primer elemento está “verticalmente por encima” de un segundo elemento, donde el primer elemento está a una altura más alta que el segundo elemento, e independientemente de si el primer elemento está alineado verticalmente con el segundo elemento.

[0030] En general, las pruebas de tejidos vegetales para determinar el estado del valor de nutrientes de las plantas son destructivas y no brindan resultados en tiempo real. Por ejemplo, un agricultor puede cosechar pecíolos de plantas en un campo de cultivo para medirlos. Los pecíolos recolectados pueden enviarse a un laboratorio para su análisis. Dependiendo de la prueba a realizar, es posible que sea necesario eliminar destructivamente una gran cantidad de pecíolos.

[0031] Luego, el laboratorio puede realizar pruebas de tejido vegetal y proporcionar valores de nutrientes del pecíolo al agricultor. El proceso de eliminación de los pecíolos, envío, análisis y notificación de resultados puede tardar semanas en completarse. Este retraso socava la eficacia de cualquier acción correctiva (por ejemplo, ajustar la composición y la cantidad de fertilizante) tomada en función de los resultados porque el contenido de nutrientes en las plantas medidas puede haber cambiado en el período intermedio.

[0032] Los sistemas, aparatos y métodos descritos pueden proporcionar una determinación no destructiva y casi en tiempo real del estado del valor de los nutrientes de las

plantas utilizando un espectrofotómetro portátil. Las moléculas absorben luz a frecuencias que son características de su estructura. El espectrofotómetro portátil puede ser utilizado para tomar medidas espectrales no destructivas que indican la presencia y concentración de diferentes moléculas (nutrientes) en la región analizada (por ejemplo, una hoja de una planta).

- 5 El espectrofotómetro portátil puede generar datos espectrales de hojas (basados en mediciones espectrales no destructivas) que pueden usarse para determinar el estado del valor nutricional de las plantas. No es necesario retirar hojas ni pecíolos de las plantas para realizar las pruebas. El sistema, el aparato y el método descritos pueden proporcionar el estado del valor de los nutrientes de las plantas sin destruir ninguna de las plantas utilizadas
10 para la prueba.

- [0033] Además, el sistema, el aparato y el método descritos pueden realizar el análisis y proporcionar los resultados casi en tiempo real, por ejemplo, en 10-20 segundos. Esto puede permitir que cualquier acción correctiva requerida (basada en el estado del valor nutricional de la planta determinado) se lleve a cabo de inmediato. Tal como se usa en el presente
15 documento y en las reivindicaciones, se dice que una acción se realiza “casi en tiempo real” cuando esa acción se realiza en menos de 1 minuto desde que se inició.

- [0034] En las mediciones de reflectancia de dosel, se utilizan plataformas terrestres o aéreas para determinar la relación entre la cantidad de luz que sale del dosel y la cantidad de luz entrante. La medición de la reflectancia del dosel se puede utilizar para calcular el estado
20 del valor de los nutrientes del cultivo. Sin embargo, las mediciones de reflectancia del dosel están frecuentemente sujetas a la interferencia atmosférica y del suelo. El sistema, aparato y método divulgados pueden usar un espectrofotómetro portátil para sondear hojas de plantas que evita la interferencia atmosférica y/o la interferencia del suelo asociada con la realización de mediciones de reflectancia del dosel usando plataformas terrestres o aéreas.

- 25 [0035] Con referencia ahora a la Figura 1, en la misma se muestra una ilustración de una planta 10 cuyo valor nutricional puede ser determinado utilizando el sistema, aparato o método divulgado. En el ejemplo ilustrado, la planta 10 incluye un tallo 14, una hoja 18 y un pecíolo 22 que une la hoja 18 al tallo 14. La hoja 18 incluye un limbo 26 y múltiples nervios 30.

- 30 [0036] El área superficial del limbo 26 de la hoja puede ser mucho mayor en comparación con el pecíolo 22 y, por lo tanto, las mediciones de reflectancia espectral pueden ser tomadas del limbo 26 de la hoja en lugar del pecíolo 22. En consecuencia, los valores de nutrientes medidos pueden ser indicativos de los valores de nutrientes correspondientes al

limbo de la hoja en lugar de los valores de nutrientes del pecíolo.

5 **[0037]** Los valores de nutrientes en los pecíolos no son los mismos que los valores de nutrientes medidos en otras partes de una planta (por ejemplo, el limbo). En la actualidad e históricamente, los agricultores han enviado pecíolos (específicamente, el cuarto pecíolo
contando a partir de la punta de la planta) a los laboratorios, y los laboratorios han devuelto los valores de nutrientes del pecíolo. Como tal, los agricultores generalmente entienden qué acciones correctivas se requieren según los valores de nutrientes del pecíolo en el laboratorio, pero no según los valores de nutrientes asociados con otras partes de la planta.

10 **[0038]** El sistema, el aparato y el método descritos pueden tomar medidas espectrales de las láminas de las hojas o limbos de una planta para producir datos espectrales de las hojas y calcular los valores de los nutrientes del pecíolo basándose en los datos espectrales de las hojas. Proporcionar valores de nutrientes del pecíolo (a diferencia de los valores de nutrientes asociados con la hoja) puede permitir que un usuario seleccione y aplique acciones correctivas bien conocidas y entendidas.

15 **[0039]** Con referencia ahora a la Figura 2, en la misma se muestra una ilustración esquemática de un sistema 100 para determinar de forma no destructiva los valores de nutrientes del pecíolo casi en tiempo real a partir de hojas de plantas 18 en un campo de cultivo 34, de acuerdo con una modalidad. Como se muestra, el sistema 100 puede incluir un espectrofotómetro portátil 104 y un servidor remoto 108.

20 **[0040]** En el ejemplo ilustrado, el espectrofotómetro portátil 104 y el servidor remoto 108 se acoplan comunicativamente utilizando una red 112. La red 112 puede incluir una red de comunicación como Internet, una red de área amplia (WAN), una red de área local (LAN), u otro tipo de red. En otros ejemplos, el espectrofotómetro portátil 104 y el servidor remoto 108 pueden no estar conectados a una red común y pueden comunicarse utilizando
25 dispositivos intermediarios y/o redes de comunicación.

[0041] El campo de cultivo 34 puede incluir múltiples plantas 10 (por ejemplo, al menos 500 plantas). Cada planta 10 puede tener una o más hojas 18. Las plantas 10 pueden incluir cualquier planta adecuada cultivada en aplicaciones agrícolas. Por ejemplo, las plantas 10 pueden incluir trigo, maíz, soya, papa, etc. El campo de cultivo 34 puede estar ubicado al aire
30 libre o dentro de un invernadero.

[0042] El espectrofotómetro portátil 104 puede tener cualquier diseño adecuado que

sea portátil y capaz de tomar medidas espectrales no destructivas de hojas de plantas 10. El espectrofotómetro portátil 104 puede tener el tamaño y el diseño para que lo lleve un operador mientras el operador usa el espectrofotómetro portátil para tomar mediciones espectrales. Por ejemplo, el espectrofotómetro portátil 104 puede funcionar con batería y estar diseñado para que un operador 38 lo lleve en una mochila.

[0043] Una fuente de luz dentro del espectrofotómetro portátil 104 puede generar luz incidente sobre una hoja y un detector dentro del espectrofotómetro portátil 104 puede medir la luz reflejada de las hojas de las plantas 10. El espectrofotómetro portátil 104 puede generar datos espectrales de hojas basados en las mediciones espectrales reflejadas.

[0044] En algunas modalidades, el espectrofotómetro portátil 104 puede tomar medidas espectrales y generar datos espectrales de hoja en rangos de longitud de onda visible y/o infrarrojo cercano. Por ejemplo, el espectrofotómetro portátil 104 puede generar datos espectrales de hojas en un rango de longitud de onda de 400 nm a 2500 nm. En otros ejemplos, el espectrofotómetro portátil 104 puede generar datos espectrales de hoja en rangos de longitud de onda más pequeños (por ejemplo, 400 nm a 2000 nm) o más grandes (por ejemplo, 350 nm a 2500 nm). Los rangos de longitud de onda más pequeños pueden permitir una finalización más rápida de las mediciones espectrales y/o requerir menos recursos para calcular los valores de nutrientes del pecíolo. Los rangos de longitud de onda más grandes pueden permitir la determinación de los valores de nutrientes del pecíolo con mayor precisión y/o la detección de una mayor cantidad de nutrientes. El rango de longitud de onda se puede ajustar de forma manual o automática en función de los valores de nutrientes que sean medidos. Por ejemplo, el operador 38 puede ajustar manualmente el rango de longitud de onda. En otros ejemplos, el rango de longitud de onda puede ajustarse automáticamente, por ejemplo, por medio del servidor remoto 108.

[0045] El espectrofotómetro portátil 104 puede tomar las medidas espectrales a intervalos discretos de longitud de onda dentro del rango de longitud de onda medido. Por ejemplo, el espectrofotómetro portátil 104 puede tomar medidas espectrales a intervalos de longitud de onda de 0,5 nm dentro del rango de longitud de onda medido. Los intervalos de longitud de onda utilizados durante las mediciones se pueden ajustar de forma manual o automática en función de los valores de nutrientes que se determinen. Por ejemplo, el operador 38 puede ajustar manualmente el intervalo de longitud de onda. En otros ejemplos, el intervalo de longitud de onda se puede ajustar automáticamente, por ejemplo, mediante el servidor remoto 108. Se pueden usar diferentes intervalos de longitud de onda que oscilan

entre 0,1 nm y 10 nm. Los intervalos de longitud de onda más pequeños pueden permitir la determinación de valores de nutrientes con mayor precisión y/o la determinación de una mayor cantidad de nutrientes. Los intervalos de longitud de onda más grandes pueden permitir una determinación más rápida de los valores de los nutrientes y/o requerir menos recursos informáticos para la determinación de los valores de los nutrientes.

[0046] En algunas modalidades, el espectrofotómetro portátil 104 puede ser un analizador NIRS™ DS2500 o un espectralradiómetro ASD™ FieldSpec 4. En otras modalidades, el espectrofotómetro portátil 104 puede ser cualquier otro espectrofotómetro adecuado.

[0047] El espectrofotómetro portátil 104 puede configurarse para transmitir los datos espectrales de hoja generados para que los reciba el servidor remoto 108. En el ejemplo ilustrado, el espectrofotómetro portátil 104 puede transmitir los datos espectrales de hoja generados al servidor remoto 108 a través de la red 112. En otros ejemplos, el espectrofotómetro portátil 104 puede transmitir los datos espectrales de la hoja generados a un dispositivo intermediario, por ejemplo, un dispositivo móvil 42 del operador 38. El espectrofotómetro portátil 104 puede transmitir los datos espectrales de la hoja generados al dispositivo móvil 42 usando comunicación punto a punto o una red de área local (por ejemplo, Bluetooth™) y el dispositivo móvil 42 puede transmitir los datos espectrales de la hoja al servidor remoto 108 usando una red de área grande/internet.

[0048] El dispositivo móvil 42 puede ser cualquier dispositivo adecuado que sea portátil y capaz de enviar y recibir datos a través de una red de comunicación (por ejemplo, redes de comunicación inalámbrica como redes de telefonía móvil y/o redes wi-fi). Por ejemplo, el dispositivo móvil 42 puede ser un computador portátil, una tableta o un teléfono inteligente con capacidades de comunicación inalámbrica. El dispositivo móvil 42 puede ser un dispositivo complementario dedicado diseñado para ser usado con el espectrofotómetro portátil 104. En algunas modalidades, el dispositivo móvil 42 puede ser un dispositivo de uso general que incluye software propietario para comunicarse con el espectrofotómetro portátil 104 y/o el análisis de datos recibidos del espectrofotómetro portátil 104. En algunas modalidades, la funcionalidad del espectrofotómetro portátil 104 y el dispositivo móvil 42 puede ser proporcionada por un solo dispositivo.

[0049] En el ejemplo ilustrado, el servidor remoto 108 incluye un procesador 116 y una memoria 120. El procesador 116 puede controlar el funcionamiento del servidor remoto 108. El procesador 116 puede ser cualquier procesador, controlador o procesador de señal digital

adecuado que pueda proporcionar suficiente potencia de procesamiento dependiendo de la configuración, propósitos y requisitos del sistema 100, como es conocido por los expertos en la materia. Por ejemplo, el procesador 116 puede ser un procesador general de alto rendimiento. Por ejemplo, el procesador 116 puede incluir un procesador estándar, como un
5 procesador Intel® o un procesador AMD®. Alternativamente, el procesador 116 puede incluir más de un procesador, estando configurado cada procesador para realizar diferentes tareas dedicadas. Alternativamente, se puede usar hardware especializado (por ejemplo, unidades de procesamiento gráfico (GPU)) para proporcionar algunas de las funciones proporcionadas por el procesador 116.

10 **[0050]** La memoria 120 puede incluir una o más de memoria de acceso aleatorio (RAM), memoria de sólo lectura (ROM), un disco duro y una memoria flash (por ejemplo, una unidad de estado sólido). El servidor remoto 108 puede almacenar datos espectrales de hojas recibidos en la memoria 120. Por ejemplo, el servidor remoto 108 puede recibir datos espectrales de hojas generados por el espectrofotómetro portátil 104 y almacenar los datos
15 espectrales de hojas recibidos en la memoria 120.

[0051] La memoria 120 también puede almacenar un modelo de aprendizaje automático (ML) entrenado para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo basadas en entradas de datos espectrales de hojas. El modelo de aprendizaje automático puede ser generado y entrenado por el servidor remoto 108. En algunas modalidades, el
20 servidor remoto 108 puede recibir un modelo de aprendizaje automático generado por un dispositivo externo. El servidor remoto 108 puede entrenar el modelo de aprendizaje automático recibido y almacenar el modelo de aprendizaje automático entrenado en la memoria 120. En otras modalidades, el servidor remoto 108 puede recibir el modelo de aprendizaje automático entrenado desde un dispositivo externo. El servidor remoto 108 puede
25 almacenar el modelo de aprendizaje automático entrenado recibido en la memoria 120.

[0052] En varias modalidades, una o más (o todas) las memorias (por ejemplo, la memoria 120) descritas en la presente como almacenadoras de modelos de aprendizaje automático pueden almacenar un proceso de aprendizaje automático que incluya el modelo o modelos de aprendizaje automático además del código de preprocesamiento de datos
30 asociado (por ejemplo, para construir, entrenar y/o evaluar el modelo o modelos de aprendizaje automático).

[0053] Las entradas de datos espectrales de hojas proporcionadas al modelo de aprendizaje automático pueden incluir, por ejemplo, datos espectrales de hojas generados por

el espectrofotómetro portátil 104 al tomar medidas espectrales de láminas de hojas o limbos de plantas. Los resultados del valor de los nutrientes del pecíolo proporcionados por el modelo de aprendizaje automático pueden incluir, por ejemplo, valores de nutrientes del pecíolo determinados para uno o más nutrientes como N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Fe, B, Cu, Al y Na.

- 5 Los valores de nutrientes del pecíolo para los diferentes nutrientes pueden expresarse como valores porcentuales (de la masa total), g/kg y/o partes por millón (ppm).

[0054] El modelo de aprendizaje automático puede ser cualquier modelo de aprendizaje automático adecuado basado en los datos de entrada a analizar, los requisitos de datos de salida, los datos de entrenamiento disponibles y/o los recursos informáticos disponibles. En algunas modalidades, el modelo de aprendizaje automático puede comprender uno o más modelos de regresión lineal múltiple (MLR) univariante o multivariante. Pueden utilizarse regularizaciones de lazo o de crestas para que el modelo MLR genere un modelo de regresión de lazo o de crestas. En otras modalidades, el modelo de aprendizaje automático puede ser un modelo diferente, por ejemplo, un modelo de regresión polinomial.

15 En otras modalidades, también pueden emplearse otros pasos de preprocesamiento de datos, como la reducción de la dimensionalidad mediante el método de Máxima Relevancia - Mínima Redundancia (MRMR).

[0055] Los datos de entrenamiento para el modelo de aprendizaje automático pueden generarse tomando medidas espectrales de plantas (por ejemplo, medidas espectrales de reflectancia de porciones de hojas) y generando datos espectrales de hojas que actúan como predictores (x) para el modelo de aprendizaje automático. Los pecíolos correspondientes de las plantas pueden retirarse y usarse para análisis de tejido de laboratorio. Los resultados del análisis de tejido de laboratorio de los pecíolos pueden actuar como respuestas (y) para el modelo de aprendizaje automático. Se pueden construir modelos de correlación entre las respuestas (y) y los predictores (x). La ecuación (1) a continuación proporciona un ejemplo de un modelo MLR que utiliza coeficientes de correlación β_i :

20

25

$$y = \beta + \sum_{i=1}^{Z_i} x_i \beta_i \quad \text{Ecuación (1)}$$

[0056] Si el número de predictores (x) es mayor que el número de respuestas (y), puede resultar en un ajuste excesivo del modelo MLR. La precisión del modelo MLR puede mejorarse utilizando métodos de selección de subconjuntos para seleccionar un subconjunto de predictores. En algunas modalidades, el modelado MLR de lazo puede ser utilizado como método de selección de subconjuntos. En otras modalidades, se pueden usar otros métodos de selección de subconjuntos, como la selección de subconjuntos por etapas o el promedio

30

del modelo bayesiano.

[0057] El modelado de lazo MLR puede ser usado para identificar los predictores más informativos y menos redundantes (longitudes de onda) usando un parámetro de complejidad (λ) que controla la cantidad de contracción: cuanto mayor sea el valor de λ , mayor puede ser la penalización de los coeficientes no cero en el modelo, y en consecuencia se puede imponer una mayor contracción en los valores de los coeficientes. Se puede generar un modelo de regresión de lazo seleccionando el valor de λ que minimiza el error cuadrático medio (RMSE). El parámetro λ elegido puede determinar el número de coeficientes que compondrán el modelo de regresión de lazo, que se seleccionan como los de mayor poder explicativo en relación con la variable objetivo por predecir. El entrenamiento del modelo y la evaluación del desempeño se pueden realizar, por ejemplo, utilizando una validación cruzada de K veces utilizando diferentes valores enteros de K, tal como 5, con el valor de λ elegido en función del RMSE más pequeño. La Tabla 1 a continuación muestra los valores de número, rango y las primeras cuatro bandas de onda significativas resultantes del modelado de lazo MLR de diferentes elementos, por ejemplo, datos espectrales de hojas obtenidos de plantas de papa.

Tabla 1Valores de número, rango y las primeras cuatro bandas de onda significativas resultantes del modelado de lazo MLR de diferentes elementos, por ejemplo, datos espectrales de hojas obtenidos de plantas de papa.

Elemento	Número de bandas	Rango de bandas (nm)	Primeras cuatro bandas de onda significativas (nm)
N	13	404-1828	660, 684, 404, 484
P	10	404-1924	708, 404, 540, 700
K	17	404-2300	404, 428, 588, 948
Ca	20	404-2100	404, 444, 588, 540
Mg	14	404-1940	700, 532, 1716, 524
S	18	404-1916	404, 588, 516, 1452
Mn	22	428-2492	660, 628, 428, 492
N	12	468-2124	1932, 524, 1852, 532
P	19	404-2316	1932, 636, 524, 2308
K	11	412-1932	684, 1932, 412, 460
Ca	23	428-2484	1940, 676, 428, 1716
Mg	17	404-2316	1932, 2308, 524, 652
S	20	548-2148	548, 972, 700, 1028

[0058] El procesador 116 puede introducir los datos espectrales de hojas recibidos (por ejemplo, del espectrofotómetro portátil 104) y/o los datos espectrales de hojas almacenados (por ejemplo, en la memoria 120) en el modelo de aprendizaje automático entrenado. El modelo de aprendizaje automático puede estimar los valores de nutrientes del pecíolo en función de los datos espectrales de la hoja. Por ejemplo, el modelo de aprendizaje automático puede estimar los valores de nutrientes del pecíolo para N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Zn, Fe, B, Cu, Al y Na en función de los datos espectrales de la hoja generados al tomar medidas espectrales de láminas foliares de las plantas de papa. El procesador 116 puede recibir los valores de nutrientes del pecíolo determinados por el modelo de aprendizaje automático.

[0059] El procesador 116 puede proporcionar un resultado casi en tiempo real que indica los valores de nutrientes del pecíolo a un dispositivo móvil. Por ejemplo, el procesador 116 puede proporcionar el resultado casi en tiempo real al dispositivo móvil 42 del operador 38. Por ejemplo, el procesador 116 puede proporcionar los resultados casi en tiempo real al dispositivo móvil 42 en menos de 1 minuto (por ejemplo, dentro de 0,01 a 30 segundos) desde que el espectrofotómetro portátil envió las medidas espectrales. Esto puede permitir que el operador 38 recopile de forma no destructiva resultados casi en tiempo real que indiquen los valores de nutrientes del pecíolo de múltiples plantas en un campo de cultivo.

[0060] Ahora se hace referencia a las Figuras 2 y 3. La Figura 3, muestra una ilustración esquemática de un resultado que indica los valores de nutrientes del pecíolo proporcionados por el sistema 100 y visualizados gráficamente en el dispositivo móvil 42. El dispositivo móvil 42 puede incluir una pantalla táctil 46 que proporciona una visualización interactiva al operador 38. La pantalla táctil 46 puede proporcionar múltiples porciones de visualización 50a-50c. Por ejemplo, la porción de visualización 50a puede proporcionar una visualización gráfica de los valores de nutrientes del pecíolo determinados. En el ejemplo ilustrado, la porción de visualización 50a proporciona gráficos de barras que muestran valores de nutrientes del pecíolo determinados para seis nutrientes. En otras modalidades, la pantalla 46 puede no estar configurada para detectar entradas táctiles.

[0061] La porción de visualización 50b puede proporcionar información adicional sobre los valores de nutrientes del pecíolo determinados, por ejemplo, el número de mediciones espectrales de hoja tomadas, los niveles de confianza asociados con los valores de nutrientes del pecíolo determinados, etc. La porción de visualización 50c puede proporcionar acciones correctivas recomendadas en función de los valores de nutrientes del pecíolo determinados.

En algunos ejemplos, una o más de las porciones de visualización 50 pueden incluir otra información no relacionada con los resultados que indican los valores de nutrientes del pecíolo.

[0062] Con referencia ahora a la Figura 4, en esta se muestra una ilustración esquemática de un aparato 200 para determinar de forma no destructiva los valores de nutrientes del pecíolo casi en tiempo real a partir de hojas de plantas en un campo de cultivo. En algunas modalidades, el aparato 200 puede ser implementado como un dispositivo de servidor (por ejemplo, el servidor remoto 108 que se muestra en la Figura 2). En otras modalidades, el aparato 200 puede implementarse usando cualquier otro componente de hardware adecuado. Por ejemplo, el aparato 200 puede implementarse como dispositivo móvil 42 (Figuras 2 y 3), integrado con espectrofotómetro portátil 104 (Figura 2), o implementado como un aparato complementario utilizable con espectrofotómetro portátil 104 (Figura 2).

[0063] Para el ejemplo de modalidad ilustrado en la Figura 4, el aparato 200 incluye una memoria 208, una aplicación 212, un dispositivo de salida 216, un dispositivo de visualización 220, un dispositivo de almacenamiento secundario 224, un procesador 228, un dispositivo de entrada 232 y un dispositivo de comunicación 236. Uno o más (o todos) de la memoria 208, la aplicación 212, el dispositivo de salida 216, el dispositivo de visualización 220, el dispositivo de almacenamiento secundario 224, el procesador 228, el dispositivo de entrada 232 y el dispositivo de comunicación 236 pueden acoplarse comunicativamente por cable y/o de forma inalámbrica.

[0064] En algunas modalidades, el aparato 200 incluye múltiples de cualquiera o más de la memoria 208, la aplicación 212, el dispositivo de salida 216, el dispositivo de visualización 220, el dispositivo de almacenamiento secundario 224, el procesador 228, el dispositivo de entrada 232 y el dispositivo de comunicación 236. En algunas modalidades, el aparato 200 no incluye una o más aplicaciones 212, dispositivos de almacenamiento secundario 224, conexiones de red, dispositivos de entrada 232, dispositivos de salida 216, dispositivos de visualización 220 y dispositivos de comunicación 236.

[0065] En al menos una modalidad, el aparato 200 incluye una conexión con una red 204 tal como una conexión por cable o inalámbrica a Internet o a una red privada. En algunos casos, la red 204 incluye otros tipos de redes informáticas o de telecomunicaciones. El aparato 200 puede recibir, a través de la red 204, datos de espectros de hojas generados por un espectrofotómetro portátil (por ejemplo, el espectrofotómetro portátil 104 de la Figura 2) basado en mediciones espectrales no destructivas de una hoja de una planta (por ejemplo,

una planta de papa) en el campo de cultivo (por ejemplo, el campo de cultivo 34 de la Figura 2).

5 **[0066]** En algunas modalidades, el aparato 200 puede recibir los datos espectrales de la hoja directamente desde el espectrofotómetro portátil por cable o de forma inalámbrica. En otras modalidades, el aparato 200 puede recibir los datos espectrales de la hoja generados por el espectrofotómetro portátil desde un dispositivo intermediario (por ejemplo, el dispositivo móvil 42 de la Figura 2).

10 **[0067]** La memoria 208 puede incluir una o más de memoria de acceso aleatorio (RAM) y memoria de sólo lectura (ROM). En algunas modalidades, la memoria 208 almacena una o más aplicaciones 212 para que las ejecute el procesador 228. Las aplicaciones 212 se corresponden con módulos de software que incluyen instrucciones ejecutables por computador para realizar el procesamiento de las funciones y métodos descritos en este documento.

15 **[0068]** La memoria 208 puede almacenar un modelo de aprendizaje automático entrenado para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo basadas en entradas de datos espectrales de hojas. El modelo de aprendizaje automático puede ser generado y entrenado por el aparato 200. En algunas modalidades, el aparato 200 puede recibir un modelo de aprendizaje automático generado desde un dispositivo externo (por ejemplo, a través de la red 204) y puede entrenar el modelo de aprendizaje automático recibido. En
20 algunas modalidades, el aparato 200 puede recibir un modelo de aprendizaje automático entrenado desde un dispositivo externo (por ejemplo, a través de la red 204) y almacenar el modelo de aprendizaje automático entrenado en la memoria 208. El modelo de aprendizaje automático puede ser cualquier modelo adecuado, por ejemplo, una regresión de modelo de lazo.

25 **[0069]** En algunas modalidades, la memoria 208 también puede almacenar datos espectrales de hojas recibidos, valores de nutrientes del pecíolo determinados y/o resultados derivados de los valores de nutrientes del pecíolo (por ejemplo, una representación gráfica de los valores de nutrientes del pecíolo). Los datos almacenados pueden ser recuperados por un usuario para el análisis de datos históricos.

30 **[0070]** El dispositivo de almacenamiento secundario 224 puede incluir cualquier medio legible por computador no transitorio adecuado que incluya instrucciones ejecutables por un procesador (por ejemplo, el procesador 228). Por ejemplo, el dispositivo de almacenamiento

secundario 224 puede incluir un disco duro, una unidad de disquete, una unidad de CD, una unidad de DVD, una unidad de Blu-ray, una unidad de estado sólido, una memoria flash u otros tipos de almacenamiento de datos no volátil. El procesador 228 puede ejecutar instrucciones incluidas en el dispositivo de almacenamiento secundario 224 para realizar el procesamiento de las funciones y métodos descritos en este documento.

[0071] En algunas modalidades, el aparato 200 almacena información en un dispositivo de almacenamiento remoto, como almacenamiento en la nube, accesible a través de una red, como la red 204 u otra red. En algunas modalidades, el aparato 200 almacena información distribuida a través de múltiples dispositivos de almacenamiento, como la memoria 208 y el dispositivo de almacenamiento secundario 224 (es decir, cada uno de los múltiples dispositivos de almacenamiento almacena una parte de la información y colectivamente los múltiples dispositivos de almacenamiento almacenan toda la información). En consecuencia, almacenar datos en un dispositivo de almacenamiento como se usa aquí y en las reivindicaciones, significa almacenar esos datos en un dispositivo de almacenamiento local, almacenar esos datos en un dispositivo de almacenamiento remoto o almacenar esos datos distribuidos a través de múltiples dispositivos de almacenamiento, cada uno de los cuales puede ser locales o remotos.

[0072] El dispositivo de entrada 232 puede incluir cualquier dispositivo para introducir información en el aparato 200. Por ejemplo, el dispositivo de entrada 232 puede ser un teclado, un teclado numérico, un dispositivo de cursor, una pantalla táctil, una cámara o un micrófono. El dispositivo de entrada 232 también puede incluir puertos de entrada y radios inalámbricos (por ejemplo, Bluetooth® o 802.11x) para realizar conexiones por cable e inalámbricas a dispositivos externos.

[0073] El dispositivo de visualización 220 puede incluir cualquier tipo de dispositivo para presentar información visual. Por ejemplo, el dispositivo de visualización 220 puede ser un monitor de computador, una pantalla plana, un proyector o un panel de visualización.

[0074] El dispositivo de salida 216 puede incluir cualquier tipo de dispositivo para presentar una copia impresa de la información, como una impresora, por ejemplo. El dispositivo de salida 216 también puede incluir otros tipos de dispositivos de salida, como altavoces, por ejemplo. En al menos una modalidad, el dispositivo de salida 216 incluye uno o más puertos de salida y radios inalámbricos (por ejemplo, Bluetooth® o 802.11x) para realizar conexiones por cable e inalámbricas a dispositivos externos.

[0075] El dispositivo de comunicación 236 puede tener cualquier diseño adecuado para recibir entradas análogas y/o digitales y para proporcionar salidas análogas y/o digitales. En algunas modalidades, el dispositivo de comunicación 236 puede incluir módulos separados para señales análogas y digitales.

5 **[0076]** El procesador 228 puede ser cualquier dispositivo que pueda ejecutar aplicaciones, instrucciones o programas legibles por computador. Las aplicaciones, las instrucciones legibles por computador o los programas pueden almacenarse en la memoria 208 o en el dispositivo de almacenamiento secundario 224, o pueden recibirse desde un almacenamiento remoto accesible a través de la red 204, por ejemplo. El procesador 228
10 puede ser un procesador general de alto rendimiento, un procesador estándar (por ejemplo, un procesador Intel® o un procesador AMD®), hardware especializado (por ejemplo, GPU) o múltiples dispositivos de procesamiento que realizan colectivamente las funciones proporcionadas por el procesador 228.

[0077] El procesador 228 puede introducir datos espectrales de hojas (por ejemplo, datos espectrales de hojas almacenados en la memoria 208) en un modelo de aprendizaje automático entrenado (por ejemplo, el modelo de aprendizaje automático entrenado almacenado en la memoria 208). El modelo de aprendizaje automático puede determinar los valores de nutrientes del pecíolo en función de los datos espectrales de la hoja. El procesador 228 puede recibir una salida del modelo de aprendizaje automático que incluye los valores de
15 nutrientes del pecíolo determinados por el modelo de aprendizaje automático.

[0078] En algunas modalidades, el procesador 228 puede proporcionar un resultado casi en tiempo real que indica los valores de nutrientes del pecíolo a un dispositivo móvil (por ejemplo, el dispositivo móvil 42 de la Figura 2). Los valores de nutrientes del pecíolo se pueden mostrar gráficamente en el dispositivo móvil. En otras modalidades, el procesador 228 puede
25 proporcionar los resultados al dispositivo de visualización 220 y los valores de nutrientes del pecíolo pueden mostrarse gráficamente en el dispositivo de visualización 220.

[0079] La Figura 4 ilustra un esquema de hardware de ejemplo de un aparato 200. En modalidades alternas, el aparato 200 contiene menos componentes, adicionales o diferentes. Además, aunque los aspectos de una implementación del aparato 200 se describen
30 almacenados en la memoria, un experto en la materia apreciará que estos aspectos también pueden almacenarse o leerse desde otros tipos de productos de programas informáticos o medios legibles por computador, como dispositivos de almacenamiento secundario, incluidos discos duros, disquetes, CD o DVD; una onda portadora de Internet u otra red; u otras formas

de RAM o ROM. Por ejemplo, el aparato 200 puede incluir un medio legible por computador no transitorio que almacena instrucciones legibles por computador que, cuando son ejecutadas por el procesador 228, configuran el procesador 228 para realizar los métodos descritos en este documento.

5 **[0080]** Con referencia ahora a la Figura 5, en esta se muestra un diagrama de flujo que ilustra un método de ejemplo 300 para determinar de forma no destructiva los valores de nutrientes del pecíolo casi en tiempo real a partir de hojas de plantas en un campo de cultivo utilizando un espectrofotómetro portátil. El método 300 se puede realizar, por ejemplo, usando el sistema 100 (Figura 2) o el aparato 200 (Figura 4) y también se hace referencia a
10 continuación a las Figuras 2 y 4.

[0081] El método 300 se puede realizar mientras se lleva el espectrofotómetro portátil en el campo de cultivo. Por ejemplo, el espectrofotómetro portátil 104 se puede llevar en el campo de cultivo 34 en una persona o vehículo.

15 **[0082]** En 308, pueden tomarse medidas espectrales no destructivas de una hoja de una planta en el campo de cultivo utilizando el espectrofotómetro transportado para generar datos espectrales de hojas. Por ejemplo, pueden tomarse medidas espectrales no destructivas de una hoja de una planta de papa utilizando un espectrofotómetro portátil 104. El espectrofotómetro portátil 104 puede generar datos espectrales de hojas basándose en las medidas espectrales.

20 **[0083]** En 312, los datos espectrales de la hoja pueden almacenarse en una memoria. En algunas modalidades, los datos espectrales de hoja generados pueden enviarse a un servidor remoto a través de una red y almacenarse en una memoria del servidor remoto. Por ejemplo, el espectrofotómetro portátil 104 puede enviar los datos espectrales de hojas generados al servidor remoto 108 a través de la red 112 y el servidor remoto 108 puede
25 almacenar los datos espectrales de hojas en la memoria 120.

[0084] En otras modalidades, los datos espectrales de hoja generados pueden enviarse a un dispositivo móvil y el dispositivo móvil puede enviar los datos espectrales de hoja a un servidor remoto a través de una red. Los datos espectrales de hoja pueden almacenarse en una memoria del servidor remoto. Por ejemplo, el espectrofotómetro portátil
30 104 puede enviar los datos espectrales de hojas generados al dispositivo móvil 42 y el dispositivo móvil 42 puede enviar los datos espectrales de hojas al servidor remoto 108 a través de la red 112. El servidor remoto 108 puede almacenar los datos espectrales de hojas

en la memoria 120.

5 **[0085]** En 316, un procesador puede calcular los valores de nutrientes del pecíolo con base en los datos espectrales de la hoja almacenados. El procesador puede calcular los valores de los nutrientes del pecíolo ingresando los datos espectrales de la hoja en un modelo de aprendizaje automático capacitado para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo en función de las entradas de datos espectrales de la hoja. En respuesta, el modelo de aprendizaje automático puede enviar los valores de nutrientes del pecíolo al procesador. Por ejemplo, el procesador 116 (o el procesador 228) puede introducir los datos espectrales de la hoja en un modelo de aprendizaje automático entrenado almacenado en la memoria 120
10 (o la memoria 208). El modelo de aprendizaje automático puede ser un modelo de regresión de lazo.

15 **[0086]** En 320, se puede proporcionar un resultado casi en tiempo real que indica los valores de nutrientes del pecíolo. En algunas modalidades, el resultado casi en tiempo real puede proporcionarse enviando los valores de nutrientes del pecíolo a un dispositivo móvil. Los valores de nutrientes del pecíolo pueden mostrarse gráficamente en el dispositivo móvil. Por ejemplo, el servidor remoto 108 o el aparato 200 pueden proporcionar el resultado casi en tiempo real enviando los valores de nutrientes del pecíolo al dispositivo móvil 42. El dispositivo móvil 42 puede mostrar gráficamente los valores de nutrientes del pecíolo.

20 **[0087]** En algunas modalidades, el método 300 puede pasar al 308 si hay hojas adicionales para la medición. Por ejemplo, el método 300 puede pasar del 308 al 320 para al menos otras cinco hojas de plantas en el campo de cultivo en diez minutos. Esto puede permitir obtener resultados casi en tiempo real que indiquen los valores de nutrientes del pecíolo correspondientes a mediciones espectrales no destructivas de múltiples hojas en un período corto de tiempo. A su vez, esto permitirá que la granja reaccione simultáneamente a
25 los valores de nutrientes del pecíolo devueltos (por ejemplo, ajustando la composición y/o la cantidad de fertilizante) antes de que el contenido de nutrientes de las plantas medidas haya tenido tiempo de cambiar. Esto puede mejorar la eficacia de las acciones correctivas, por lo que se puede mejorar el rendimiento y/o la cantidad del cultivo.

30 **[0088]** En otras modalidades, el procesamiento de los datos espectrales de la hoja con aprendizaje automático puede seguir un enfoque de dos capas para proporcionar estimaciones más precisas de los valores de nutrientes del pecíolo (denominados en la presente "valores refinados de nutrientes del pecíolo "). Una primera capa ML puede implicar uno o más primeros modelos de aprendizaje automático (por ejemplo, una o más instancias

independientes del modelo de aprendizaje automático descrito anteriormente con referencia a las Figuras 1-5). Una segunda capa ML puede incluir uno o más segundos modelos de aprendizaje automático. Los valores de nutrientes del pecíolo determinados por el primer modelo de aprendizaje automático en la primera capa pueden refinarse para producir valores estadísticamente más precisos (es decir, valores para uno o más nutrientes del pecíolo que están más cerca de los valores reales de uno o más nutrientes de un pecíolo que se habrían obtenido si el pecíolo se hubiera retirado y medido destructivamente en un laboratorio de acuerdo con métodos tradicionales). En estas modalidades, los valores de nutrientes del pecíolo determinados por la primera capa del uno o más modelos de aprendizaje automático pueden denominarse valores preliminares de nutrientes del pecíolo.

[0089] La primera capa del uno o más modelos de aprendizaje automático puede ser entrenada y almacenada de la manera descrita anteriormente. En algunas modalidades, solamente un pequeño subconjunto de los atributos más explicativos (es decir, valores de intensidad relacionados con longitudes de onda específicas o intervalos de longitud de onda de los datos espectrales de hoja recogidos) se introducen en el primer modelo(s) de aprendizaje automático. De este modo se aborda el problema de que el conjunto de datos incluye un gran número de atributos (es decir, la alta dimensionalidad del espacio de atributos). Antes de introducir los atributos en la primera capa del modelo o modelos de aprendizaje automático, se puede realizar un paso de reducción de atributos (por ejemplo, selección de atributos de mínima redundancia y máxima relevancia (MRMR)) de forma independiente para cada variable objetivo con el fin de extraer un subconjunto de atributos que se introducirán en la primera capa del uno o más modelos de aprendizaje automático. La preselección de atributos puede mejorar el rendimiento de la estimación de la mayoría de los nutrientes. También puede realizarse un paso de regularización del modelo, por ejemplo, un modelo de regresión de lazo, como se ha explicado anteriormente, que elimina cualquier atributo que no se considere que contribuye significativamente a la capacidad predictiva del modelo.

[0090] La memoria 120 (o memoria 208) puede almacenar la segunda capa del uno o más modelos de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valores refinados de nutrientes de pecíolo basados en salidas de valores preliminares de nutrientes de pecíolo por la primera capa del uno o más modelos de aprendizaje automático. La segunda capa del uno o más modelos de aprendizaje automático puede ser generada y entrenada por el servidor 108 remoto. En algunas modalidades, el servidor remoto 108 puede recibir una segunda capa del uno o más modelos de aprendizaje automático generados por un dispositivo

externo. El servidor remoto 108 puede entrenar la segunda capa del uno o más modelos de aprendizaje automático recibida y almacenar la segunda capa entrenada del uno o más modelos de aprendizaje automático en la memoria 120 (o memoria 208). En otras modalidades, la segunda capa entrenada del uno o más modelos de aprendizaje automático puede ser recibida por el servidor remoto 108 desde un dispositivo externo. El servidor remoto 108 puede almacenar la segunda capa entrenada del uno o más modelos de aprendizaje automático recibido en la memoria 120 (o memoria 208).

[0091] La segunda capa del uno o más modelos de aprendizaje automático puede estar compuesta por cualquier tipo adecuado de modelo de aprendizaje automático basado en los datos de entrada a analizar, los requisitos de datos de salida, los datos de entrenamiento disponibles y/o los recursos informáticos disponibles. En algunas modalidades, uno o más (o todos) de los segundos modelos de aprendizaje automático utilizados en la segunda capa pueden ser modelos de regresión múltiple no lineal, tales como, pero no limitados a, regresión de vectores de soporte (SVR), bosque aleatorio (RF) o refuerzo de gradiente extremo (XGB).

[0092] Como se ha descrito anteriormente, el primer uno o más modelos de aprendizaje automático en la primera capa pueden ser entrenados utilizando conjuntos de datos que incluyen conjuntos coincidentes de datos espectrales de hojas y valores de nutrientes de pecíolo medidos en laboratorio. Esto permite a la primera capa del uno o más modelos de aprendizaje automático establecer relaciones entre los valores de datos espectrales de la hoja y los valores individuales de nutrientes del pecíolo.

[0093] Generalmente, existe una influencia superpuesta en la reflectancia a diferentes longitudes de onda debido a las intrincadas relaciones entre las concentraciones de nutrientes en las plantas. Una determinada especie de planta tendrá una cierta propensión a absorber una variedad de nutrientes (es decir, una especie tiene características específicas de absorción de nutrientes). La absorción de determinados nutrientes se verá afectada por la absorción de otros nutrientes. Por ejemplo, para una especie de planta, cuando la planta absorbe un determinado nutriente "x", tenderá a absorber también el nutriente "y" (es decir, existe una correlación positiva entre el nutriente "x" y el nutriente "y"). Pero cuando la planta absorbe el nutriente "x", también puede tender a reducir la absorción del nutriente "z" (es decir, existe una correlación negativa entre el nutriente "x" y el nutriente "z"). Por ejemplo, el potasio (K) y el magnesio (Mg) son conocidos por sus antagonismos como cationes competitivos para la absorción por las plantas.

[0094] Por lo tanto, refinar los valores preliminares de nutrientes del pecíolo determinados a partir de los datos espectrales de la hoja basados en las interrelaciones entre los nutrientes para la especie de planta dada puede proporcionar resultados estadísticamente más precisos.

5 **[0095]** La no linealidad del segundo uno o más modelos de aprendizaje automático en la segunda capa permite que el uno o más modelos tengan en cuenta estas características de absorción de nutrientes y los resultados potencialmente correlacionados simultáneamente. El segundo uno o más modelos de aprendizaje automático en la segunda capa pueden ser
10 de nutrientes en el pecíolo. El segundo uno o más modelos de aprendizaje automático de la segunda capa puede procesar estos datos para establecer las relaciones de absorción entre diferentes nutrientes para una especie vegetal determinada. Es importante destacar que las características de absorción de nutrientes de las distintas especies de plantas variarán.

[0096] La Figura 6 muestra una tabla 400 que demuestra un ejemplo de característica
15 de absorción de nutrientes para una especie de plantas de papa. Como puede verse en la Figura 6, por ejemplo, la absorción de nitrógeno (N) de la planta de papa tiende a promover la absorción de fósforo (P) (mostrado con el valor positivo 0,83). Sin embargo, cuando una planta de papa absorbe nitrógeno, también tiende a reducir la absorción de boro (B) (mostrado con el valor negativo -0,66). En otras palabras, existe una correlación positiva entre la
20 absorción de nitrógeno y fósforo, pero una correlación negativa entre la absorción de nitrógeno y boro. Como se muestra en la Figura 6, se puede determinar una correlación entre cada nutriente esperado del pecíolo. Teniendo en cuenta las correlaciones entre la absorción de diferentes nutrientes permite que los valores refinados de nutrientes del pecíolo sean estadísticamente más precisos que los valores preliminares de nutrientes del pecíolo
25 obtenidos del primer uno o más modelos de aprendizaje automático de la primera capa a la que se introdujeron los datos espectrales de la hoja.

[0097] Las razones de las correlaciones positivas y negativas en la absorción de diferentes nutrientes son muy variadas. A continuación se ilustran algunos ejemplos que pueden aplicarse a una o más especies de plantas de papa. La relación positiva entre N y P
30 puede deberse a que la fijación de N puede depender de la disponibilidad de P en el suelo para su absorción por las plantas. El efecto contrapuesto entre el calcio (Ca) y el P puede deberse a la precipitación de fosfatos cálcicos menos solubles en las proximidades de las raíces que absorben nutrientes. El K y el Mg pueden ser cationes competitivos para la

absorción por las plantas. El Ca y el Mg pueden contribuir sinérgicamente a mantener un pH estable en el suelo. El N puede estar negativamente interrelacionado con el Mg, ya que el aumento de las tasas de N puede verse reducido por la adición de tasas de Mg. El B tiene una correlación negativa con el P, pero la disponibilidad de B se ve influida positivamente por la presencia de Ca. La absorción de K por las plantas puede atribuirse al N por su papel en el desarrollo del área foliar y la fotosíntesis. La forma de aplicación del K como sulfato puede conducir a la distribución de la asimilación del azufre (S). Por ejemplo, algunos fertilizantes de K incluyen potasio como K_2SO_4 de tal forma que la aplicación de potasio va acompañada de azufre. Un aumento del suministro de K (por ejemplo, al suelo mediante fertilizantes) suele provocar un aumento de la absorción de K por la planta, lo que puede disminuir la concentración de manganeso (Mn) en las hojas. Un suministro creciente de S (por ejemplo, al suelo mediante fertilizantes) suele traducirse en un aumento de la absorción de S por la planta, lo que puede mejorar la absorción de K y P. Una dosis elevada de K puede disminuir la absorción de hierro (Fe) al mejorar la tolerancia a la toxicidad del Fe. Existe un efecto contrario entre el cobre (Cu) y el Ca, ya que la translocación de Ca de las raíces a las hojas puede verse alterada en presencia de Cu.

[0098] Refiriéndose ahora a la Figura 7, se muestra en el mismo un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de método 500 para determinar valores refinados de nutrientes del pecíolo basados en datos espectrales de hojas de plantas. El método 500 puede ser realizado, por ejemplo, usando el sistema 100 (Figura 2) o el aparato 200 (Figura 4) y se hace referencia a las Figuras 2 y 4 a continuación.

[0099] El método 500 puede realizarse mientras se lleva el espectrofotómetro portátil en el campo de cultivo. Por ejemplo, el espectrofotómetro portátil 104 puede ser transportado en el campo de cultivo 34 sobre una persona o vehículo. El método 500 también puede realizarse utilizando cualquier otro espectrofotómetro adecuado, incluyendo espectrofotómetros que no sean portátiles.

[0100] El método 500 puede incluir opcionalmente el paso 504. En 504, pueden tomarse mediciones espectrales de una hoja de una planta utilizando un espectrofotómetro (por ejemplo, el espectrofotómetro portátil 104) para generar datos espectrales de la hoja. Por ejemplo, las mediciones espectrales pueden tomarse de una hoja de una planta de papa.

[0101] En 506, los datos espectrales de la hoja se pueden almacenar en una memoria. En algunas modalidades, los datos espectrales de hoja generados pueden enviarse a un servidor remoto a través de una red y almacenarse en una memoria del servidor remoto. Por

ejemplo, el espectrofotómetro portátil 104 puede enviar los datos espectrales de hoja generados al servidor remoto 108 a través de la red 112 y el servidor remoto 108 puede almacenar los datos espectrales de hoja en la memoria 120.

5 **[0102]** En otras modalidades, los datos espectrales de hoja generados pueden ser enviados a un dispositivo móvil y el dispositivo móvil puede enviar los datos espectrales de hoja a un servidor remoto a través de una red. Los datos espectrales de la hoja se pueden almacenar en una memoria del servidor remoto. Por ejemplo, el espectrofotómetro portátil 104 puede enviar los datos espectrales de la hoja generados al dispositivo móvil 42 y el dispositivo móvil 42 puede enviar los datos espectrales de la hoja al servidor remoto 108 a través de la
10 red 112. El servidor remoto 108 puede almacenar los datos espectrales de la hoja y enviarlos a un servidor remoto a través de una red. El servidor remoto 108 puede almacenar los datos espectrales de la hoja en la memoria 120.

[0103] En 508, un procesador puede transformar los datos espectrales de la hoja en valores preliminares de nutrientes del pecíolo. El procesador puede transformar los datos
15 espectrales de la hoja ingresando los datos espectrales de la hoja en uno o más modelos de aprendizaje automático lineal entrenados para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo basadas en entradas de datos espectrales de la hoja. En respuesta, el modelo o modelos lineales de aprendizaje automático pueden proporcionar al procesador los valores preliminares de nutrientes del pecíolo. Por ejemplo, el procesador 116 (o procesador 228)
20 puede introducir los datos espectrales de la hoja en uno o más modelos de aprendizaje automático lineal entrenados almacenados en la memoria 120 (o memoria 208). Uno o más (o todos) de los modelos de aprendizaje automático lineal puede ser un modelo de regresión de lazo.

[0104] En 510, el procesador puede refinar los valores preliminares de nutrientes del
25 pecíolo ingresando los valores preliminares de nutrientes del pecíolo en uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas refinadas de valores de nutrientes del pecíolo basadas en entradas preliminares de valores de nutrientes del pecíolo. En respuesta, el modelo o modelos no lineales de aprendizaje automático pueden enviar los valores refinados de nutrientes del pecíolo al procesador. Por ejemplo, el
30 procesador 116 (o procesador 228) puede introducir los valores preliminares de nutrientes del pecíolo en el modelo o modelos de aprendizaje automático no lineal entrenado(s) almacenado(s) en la memoria 120 (o memoria 208). Uno o más (o todos) de los modelos de aprendizaje automático no lineal puede ser un modelo de regresión multivariante.

[0105] En 512, puede emitirse un informe de nutrientes de la planta indicativo de los valores refinados de nutrientes del pecíolo. Un informe de nutrientes de la planta puede tener cualquier formato adecuado, incluyendo pero no limitado a una lista, una tabla, un gráfico, una representación gráfica, cualquier tipo de visualización (por ejemplo, infografía, mapa, etc.), o una animación de los valores de nutrientes del pecíolo refinados. En algunas modalidades, el informe de nutrientes de la planta puede emitirse enviando los valores refinados de nutrientes del pecíolo a un dispositivo móvil. Por ejemplo, el servidor remoto 108 o el aparato 200 pueden proporcionar el resultado casi en tiempo real (por ejemplo, en menos de 1 minuto desde la finalización del paso 506) enviando los valores refinados de nutrientes del pecíolo al dispositivo móvil 42. El dispositivo móvil 42 puede mostrar gráficamente los valores refinados de nutrientes del pecíolo a un dispositivo móvil. El dispositivo móvil 42 puede mostrar gráficamente los valores de nutrientes del pecíolo.

[0106] En algunas modalidades, el método 500 puede proceder al paso 504 o 506 si hay hojas adicionales para medir. Por ejemplo, el método 500 puede realizar un bucle a través de 504 y/o 506 hasta 512 para al menos otras cinco hojas de la planta en el campo de cultivo en aproximadamente una hora. Esto puede permitir obtener resultados que indiquen los valores refinados de nutrientes del pecíolo correspondientes a las mediciones espectrales de múltiples hojas en un corto período de tiempo. A su vez, esto permitirá a la granja reaccionar de forma contemporánea a los valores refinados de nutrientes del pecíolo devueltos (por ejemplo, ajustando la composición y/o la cantidad de fertilizante) antes de que el contenido de nutrientes de las plantas medidas haya tenido tiempo de cambiar. Esto puede mejorar la efectividad de las acciones correctivas, por lo que se puede mejorar el rendimiento y/o la cantidad del cultivo.

[0107] En 514, puede aplicarse opcionalmente un tratamiento al cultivo (por ejemplo, incluyendo y/o en las proximidades de las plantas medidas). El tratamiento puede incluir la aplicación (por ejemplo, pulverización o esparcimiento) de fertilizantes líquidos y/o sólidos (por ejemplo, granulados) al cultivo. El tratamiento puede determinarse (por ejemplo, por el procesador 116 o 228) basado al menos en parte en los valores refinados de nutrientes del paso 512. El tratamiento puede aplicarse bajo el control de la autoridad competente. El tratamiento puede aplicarse bajo el control de un operador humano y/o como lo indique la automatización electrónica (por ejemplo, dirigida por el procesador 116 o 228).

[0108] El enfoque de dos capas descrito en la presente, que incluye modelos de aprendizaje automático lineales y no lineales, puede aumentar sustancialmente la precisión

de la predicción de nutrientes. En particular, la estimación de Zn, Fe y Al es sustancialmente más precisa en comparación con el uso exclusivo de modelos de aprendizaje automático lineales en un enfoque de una capa.

5 [0109] Aunque la anterior descripción suministra ejemplos de las modalidades, se apreciará que algunas características y/o funciones de las modalidades descritas son susceptibles de modificación sin salirse del espíritu y los principios de operación de las modalidades descritas. En consecuencia, lo que se ha descrito anteriormente pretende ser ilustrativo de la invención y no limitante y se entenderá por expertos en la materia que otras variaciones y modificaciones pueden ser hechas sin salirse del alcance de la invención como
10 se define en las reivindicaciones adjuntas. El alcance de las reivindicaciones no debe ser limitado por las modalidades preferidas y los ejemplos, sino que se le debe dar la interpretación más amplia consistente con la descripción en su totalidad.

ÍTEMS

Ítem 1: Un método para determinar de manera no destructiva los valores de nutrientes del pecíolo casi en tiempo real a partir de las hojas de plantas en un campo de cultivo usando un
15 espectrofotómetro portátil, el método comprende: (a) tomar mediciones espectrales no destructivas de una hoja de una planta en el campo de cultivo usando el espectrofotómetro portátil para generar datos espectrales de hojas, (b) almacenar los datos espectrales de hojas en una memoria; (c) calcular, mediante un procesador, los valores de nutrientes del pecíolo con base en los datos espectrales de la hoja almacenados; y (d) proporcionar un resultado
20 casi en tiempo real que indica los valores de nutrientes del pecíolo.

Ítem 2: El método de cualquier ítem anterior, en donde dicho suministro comprende enviar los valores de nutrientes del pecíolo a un dispositivo móvil.

Ítem 3: El método de cualquier ítem anterior, en donde dicho suministro comprende
25 además mostrar gráficamente los valores de nutrientes del pecíolo en el dispositivo móvil.

Ítem 4: El método de cualquier ítem anterior, en donde dicho almacenamiento comprende enviar los datos espectrales de hoja a un servidor remoto a través de una red, en donde el servidor remoto comprende la memoria y el procesador.

Ítem 5: El método de cualquier ítem anterior, en donde dicho almacenamiento
30 comprende un dispositivo móvil que recibe los datos espectrales de la hoja y el dispositivo móvil envía los datos espectrales de la hoja a través de una red a un servidor remoto, en

donde el servidor remoto comprende la memoria y el procesador.

Ítem 6: El método de cualquier ítem anterior, en donde dicho suministro comprende enviar los valores de nutrientes del pecíolo desde el servidor remoto al dispositivo móvil y mostrar gráficamente los valores de nutrientes del pecíolo en el dispositivo móvil.

- 5 Ítem 7: El método de cualquier ítem anterior, que además comprende repetir los pasos (a) a (d) para al menos otras cinco hojas de plantas en el campo de cultivo dentro de diez minutos.

Ítem 8: El método de cualquier ítem anterior, en donde la planta es una planta de papa.

- 10 Ítem 9: El método de cualquier ítem anterior, en donde dicho cálculo comprende ingresar los datos espectrales de la hoja en uno o más modelos de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valor de nutrientes del pecíolo basados en entradas de los datos espectrales de la hoja, el uno o más modelos de aprendizaje automático genera los valores de nutrientes del pecíolo.

- 15 Ítem 10: El método de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos de aprendizaje automático es un modelo de regresión de lazo.

- 20 Ítem 11: Un aparato para determinar de forma no destructiva los valores de los nutrientes del pecíolo casi en tiempo real a partir de las hojas de plantas en un campo de cultivo, el aparato comprende: una memoria que almacena uno o más modelos de aprendizaje automático entrenados para proporcionar valores de nutrientes del pecíolo basados en entradas de datos espectrales de la hoja; y al menos un procesador acoplado comunicativamente con la memoria, el por lo menos un procesador se configura para colectivamente: recibir datos espectrales de hojas generados por un espectrofotómetro portátil basado en mediciones espectrales no destructivas de una hoja de una planta en el campo de cultivo; almacenar los datos espectrales de la hoja en la memoria; ingresar los datos
25 espectrales de la hoja en el uno o más modelos de aprendizaje automático; recibir un resultado que comprende los valores de nutrientes del pecíolo determinados por el uno o más modelos de aprendizaje automático basados en los datos espectrales de la hoja; y proporcionar un resultado casi en tiempo real a un dispositivo móvil, el resultado casi en tiempo real indica los valores de nutrientes del pecíolo.

- 30 Ítem 12: El aparato de cualquier ítem anterior, en donde los valores de nutrientes del pecíolo se muestran gráficamente en el dispositivo móvil.

Ítem 13: El aparato de cualquier ítem anterior, en donde los datos espectrales de hoja generados por el espectrofotómetro portátil son recibidos a través de una red desde el dispositivo móvil.

5 Ítem 14: El aparato de cualquier ítem anterior, en donde la planta es una planta de papa.

Ítem 15: El aparato de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos de aprendizaje automático es un modelo de regresión de lazo.

10 Ítem 16: El aparato de cualquier ítem anterior, en donde la memoria comprende una o más memoria de acceso aleatorio (RAM), memoria de solo lectura (ROM), un disco duro y una memoria flash.

15 Ítem 17: Un medio legible por computador no transitorio que comprende instrucciones ejecutables por un procesador, donde las instrucciones cuando se ejecutan configuran el procesador para: recibir datos espectrales de hojas generados por un espectrofotómetro portátil basado en mediciones espectrales no destructivas de una hoja de una planta en un campo de cultivo; almacenar los datos espectrales de la hoja en una memoria; ingresar los datos espectrales de la hoja en uno o más modelos de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valor de nutrientes del pecíolo basadas en las entradas de los datos espectrales de la hoja; recibir un resultado que comprende los valores de nutrientes del pecíolo determinados por el uno o más modelos de aprendizaje automático basados en los
20 datos espectrales de la hoja; y proporcionar un resultado casi en tiempo real que indica los valores de nutrientes del pecíolo.

Ítem 18: El medio legible por computador no transitorio de cualquier ítem anterior, en donde los datos espectrales de la hoja generados por el espectrofotómetro portátil son recibidos a través de una red desde un dispositivo móvil.

25 Ítem 19: El medio legible por computador no transitorio de cualquier ítem anterior, en donde la planta es una planta de papa.

Ítem 20: El medio legible por computador no transitorio de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos de aprendizaje automático es un modelo de regresión de lazo.

30 Ítem 21: El medio legible por computador no transitorio de cualquier ítem anterior, en

donde la memoria comprende una o más memoria de acceso aleatorio (RAM), memoria de solo lectura (ROM), un disco duro y una memoria flash.

Ítem 22: Un sistema para determinar de forma no destructiva los valores de nutrientes del pecíolo casi en tiempo real a partir de hojas de plantas en un campo de cultivo, el sistema comprende: un espectrofotómetro portátil configurado para: generar datos espectrales de hojas basados en mediciones espectrales no destructivas de una hoja de una planta en el campo de cultivo; y transmitir los datos espectrales de la hoja para que los reciba un servidor remoto a través de una red; y el servidor remoto comprende un procesador y una memoria, la memoria almacena uno o más modelos de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo basadas en entradas de datos espectrales de hojas, el servidor remoto configurado para: recibir los datos espectrales de hojas; almacenar los datos espectrales de la hoja en la memoria; ingresar los datos espectrales de la hoja en el uno o más modelos de aprendizaje automático; recibir los valores de nutrientes del pecíolo determinados por el uno o más modelos de aprendizaje automático basados en los datos espectrales de la hoja; y proporcionar un resultado casi en tiempo real que indica los valores de nutrientes del pecíolo a un dispositivo móvil.

Ítem 23: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde los valores de los nutrientes del pecíolo se muestran gráficamente en el dispositivo móvil.

Ítem 24: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde el espectrofotómetro portátil está configurado para transmitir los datos espectrales de la hoja al dispositivo móvil y el dispositivo móvil transmite los datos espectrales de la hoja al servidor remoto.

Ítem 25: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde la planta es una planta de papa.

Ítem 26: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos de aprendizaje automático es un modelo de regresión de lazo.

Ítem 27: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde la memoria comprende uno o más de memoria de acceso aleatorio (RAM), memoria de solo lectura (ROM), un disco duro y una memoria flash.

Ítem 28: Un método para determinar valores refinados de nutrientes del pecíolo basados en los datos espectrales de las hojas de plantas, comprendiendo el método: (a) almacenar los datos espectrales de la hoja en una memoria; (b) transformar, utilizando un

procesador, los datos espectrales de la hoja en valores preliminares de nutrientes del pecíolo ingresando los datos espectrales de la hoja en uno o más modelos lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo basadas en entradas de datos espectrales de la hoja, emitiendo el uno o más modelos lineales de aprendizaje automático los valores preliminares de nutrientes del pecíolo; (c) refinar, utilizando el procesador, los valores preliminares de nutrientes del pecíolo ingresando los valores preliminares de nutrientes del pecíolo en uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valores refinados de nutrientes del pecíolo basados en entradas de valores preliminares de nutrientes del pecíolo, obteniendo los valores refinados de nutrientes del pecíolo del uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático; y (d) emitir un informe de nutrientes de la planta indicativo de los valores refinados de nutrientes del pecíolo.

Ítem 29: El método de cualquier ítem anterior, en donde el uno o más modelos de aprendizaje automático no lineal se entrenan para modelar interrelaciones en las características de absorción de nutrientes de diferentes nutrientes de la planta.

Ítem 30: El método de cualquier ítem anterior, comprendiendo además, antes de dicho almacenamiento, tomar medidas espectrales de una hoja de una planta utilizando un espectrofotómetro para generar datos espectrales de la hoja.

Ítem 31: El método de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos lineales de aprendizaje automático es un modelo de regresión de lazo.

Ítem 32: El método de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos de aprendizaje automático no lineal es un modelo de regresión multivariante.

Ítem 33: El método de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos de aprendizaje automático no lineal es uno de: un modelo de regresión de vectores de soporte (SVR), un modelo de bosque aleatorio (RF) y un modelo de refuerzo de gradiente extremo (XGB).

Ítem 34: El método de cualquier ítem anterior, en donde dicha salida comprende enviar los valores refinados de nutrientes del pecíolo a un dispositivo móvil.

Ítem 35: El método de cualquier ítem anterior, en donde dicha salida comprende además mostrar gráficamente los valores de nutrientes del pecíolo refinados en el dispositivo móvil.

Ítem 36: El método de cualquier ítem anterior, en donde dicho almacenamiento comprende enviar los datos espectrales de la hoja a un servidor remoto a través de una red, en donde el servidor remoto comprende la memoria y el procesador.

5 Ítem 37: El método de cualquier ítem anterior, en donde dicho almacenamiento comprende un dispositivo móvil que recibe los datos espectrales de la hoja y el dispositivo móvil que envía los datos espectrales de la hoja a través de una red a un servidor remoto, en donde el servidor remoto comprende la memoria y el procesador.

10 Ítem 38: El método de cualquier ítem anterior, en donde dicha salida comprende enviar los valores refinados de nutrientes del pecíolo desde el servidor remoto al dispositivo móvil y mostrar gráficamente los valores refinados de nutrientes del pecíolo en el dispositivo móvil.

Ítem 39: El método de cualquier ítem anterior, en donde las hojas de la planta son hojas de planta de papa.

15 Ítem 40: El método de cualquier ítem anterior, que comprende además aplicar un tratamiento fertilizante a las plantas basado al menos en parte en los valores refinados de nutrientes del pecíolo.

Ítem 41: Un medio no transitorio legible por computador que comprende instrucciones ejecutables por un procesador, en donde las instrucciones al ser ejecutadas configuran al procesador para: almacenar datos espectrales de hojas de plantas en una memoria; transformar, usando un procesador, los datos espectrales de hojas en valores preliminares de
20 nutrientes del pecíolo ingresando los datos espectrales de hojas en uno o más modelos lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valores de nutrientes del pecíolo basados en entradas de datos espectrales de hojas; recibir una salida que comprende los valores preliminares de nutrientes del pecíolo de uno o más modelos lineales de aprendizaje automático; refinar, usando un procesador, los valores preliminares
25 de nutrientes del pecíolo ingresando los valores preliminares de nutrientes del pecíolo en uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas refinadas de valores de nutrientes del pecíolo basados en entradas preliminares de valores de nutrientes del pecíolo; recibir una salida que comprenda los valores refinados de nutrientes del pecíolo de uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático; y emitir un informe
30 de nutrientes de la planta indicativo de los valores refinados de nutrientes del pecíolo.

Ítem 42: El medio no transitorio legible por computador de cualquier ítem anterior, en

donde el uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático se entrenan para modelar interrelaciones en las características de absorción de nutrientes de diferentes nutrientes de la planta.

5 Ítem 43: El medio no transitorio legible por computador de cualquier ítem anterior, en donde las instrucciones al ejecutarse configuran al procesador para recibir los datos espectrales tomados de una hoja de una planta utilizando un espectrofotómetro.

Ítem 44: El medio no transitorio legible por computador de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos lineales de aprendizaje automático es un modelo de regresión de lazo.

10 Ítem 45: El medio no transitorio legible por computador de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático es un modelo de regresión multivariante.

15 Ítem 46: El medio no transitorio legible por computador de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos de aprendizaje automático no lineal es uno de: un modelo de regresión de vectores de soporte (SVR), un modelo de bosque aleatorio (RF), y un modelo de refuerzo de gradiente extremo (XGB).

Ítem 47: El medio no transitorio legible por computador de cualquier ítem anterior, en donde dicha salida comprende enviar los valores refinados de nutrientes del pecíolo a un dispositivo móvil.

20 Ítem 48: El medio no transitorio legible por computador de cualquier ítem anterior, en donde las instrucciones cuando se ejecutan configuran el procesador para aplicar un tratamiento fertilizante a las plantas basado al menos en parte en los valores refinados de nutrientes del pecíolo.

25 Ítem 49: Un sistema para determinar valores de nutrientes de pecíolo refinados basados en datos espectrales de hojas de plantas, comprendiendo el sistema: una memoria configurada para almacenar datos espectrales de hojas de plantas; y un procesador configurado para: transformar los datos espectrales de la hoja en valores preliminares de nutrientes del pecíolo ingresando los datos espectrales de la hoja en uno o más modelos lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas de valores de
30 nutrientes del pecíolo basados en entradas de datos espectrales de la hoja; recibir una salida que comprende los valores preliminares de nutrientes del pecíolo de uno o más modelos

lineales de aprendizaje automático; refinar los valores preliminares de nutrientes del pecíolo ingresando los valores preliminares de nutrientes del pecíolo en uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático entrenados para proporcionar salidas refinadas de valores de nutrientes del pecíolo basados en entradas preliminares de valores de nutrientes del pecíolo; recibir una salida que comprenda los valores refinados de nutrientes del pecíolo de uno o más modelos no lineales de aprendizaje automático; y emitir un informe de nutrientes de la planta indicativo de los valores refinados de nutrientes del pecíolo.

Ítem 50: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde el uno o más modelos de aprendizaje automático no lineal se entrenan para modelar interrelaciones en las características de absorción de nutrientes de diferentes nutrientes de la planta.

Ítem 51: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde el procesador está configurado además para recibir los datos espectrales tomados de una hoja de una planta utilizando un espectrofotómetro.

Ítem 52: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos de aprendizaje automático lineal es un modelo de regresión de lazo.

Ítem 53: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos de aprendizaje automático no lineal es un modelo de regresión multivariante.

Ítem 54: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde cada uno de los uno o más modelos de aprendizaje automático no lineal es uno de los siguientes: un modelo de regresión de vectores de soporte (SVR), un modelo de bosque aleatorio (RF) y un modelo de refuerzo de gradiente extremo (XGB).

Ítem 55: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde dicha salida comprende el envío de los valores refinados de nutrientes del pecíolo a un dispositivo móvil.

Ítem 56: El sistema de cualquier ítem anterior, en donde el procesador está configurado además para aplicar un tratamiento fertilizante a las plantas basado al menos en parte en los valores refinados de nutrientes del pecíolo.