



PRINCIPIOS AGRONÓMICOS:
Bases para una Teoría Agronómica

Rafael Novoa Soto-Aguilar

Santiago de Chile - 2014

Santiago, 6 de Agosto del 2014

Sr. Presidente de a Sociedad Agrnómica de Chile,
Don Horst Berger:

Estimado sr. Presidente:

Tengo el agrado de ceder mis derechos de autor del libro escito por mí y que editara la Sociedad Agronómica de Chile titulado "Principios Agronómicos: Bases para una teoríaa agronómica".

Saluda atenta Ud.



Rafael Novoa Soto-Aguilar.
RUT: 4140186-9

**SOCIEDAD AGRONÓMICA
DE CHILE**

**PRINCIPIOS AGRONÓMICOS:
Bases para una Teoría Agronómica**

Rafael Novoa Soto-Aguilar

Santiago de Chile - 2014

Autor:

Rafael Novoa Soto-Aguilar.

PRINCIPIOS AGRONÓMICOS: BASES PARA UNA TEORÍA AGRONÓMICA

Para citar:

Novoa, R. 2014. Principios Agronómicos: Bases para una teoría Agronómica. Santiago, Chile, Sociedad Agronómica de Chile. 108 p.

Responsable edición: Pedro Calandra Bustos.

Compilación: Denisse Espinoza Aravena.

® Derechos Reservados

Se autoriza la reproducción parcial de la información aquí contenida, siempre y cuando se cite esta publicación como fuente.

Sociedad Agronómica de Chile

Mac-Iver 120 of. 36 - Santiago, Chile

Versión digital disponible en:

Santiago de Chile – 2014

PRINCIPIOS AGRONÓMICOS: BASES PARA UNA TEORÍA AGRONÓMICA

Rafael Novoa Soto-Aguilar
Universidad de Chile

INDICE

	Pág.
Resumen	7
Summary	7
1. Introducción	9
1.1 Ciencias, Teorías y Agronomía	9
1.2 Agricultura y Agronomía	11
1.3 El método científico aplicado a la agronomía	12
2. Principios Agronómicos	17
2.1 Uso de organismos, seleccionados o mejorados, eficientes	17
2.2 Proveer condiciones ecológicas adecuadas	24
2.2.1 Condiciones climáticas y meteorológicas	24
2.2.1.1 Condiciones de energía Electromagnética	25
2.2.1.2 Condiciones térmicas	26
2.2.2 Condiciones atmosféricas	28
2.2.3 Condiciones edáficas	29
2.2.3.1 Sostén para plantas y animales	30
2.2.3.2 Reservas de: energía térmica, agua, nutrientes	30
2.2.3.3 Hábitat a gran variedad de organismos	30
2.2.3.4 Superficie de intercambio de energía	31
2.2.4 Técnicas para cambiar las condiciones del suelo	32
2.2.4.1 Laboreo suelo y subsolado	32
2.2.4.2 Fertilización, salinidad y pH	33
2.2.4.3 Riego y drenaje	37
2.2.4.4 Sanidad	37
2.2.5 Condiciones hídricas	37
2.2.6 Condiciones sanitarias	39
2.2.6.1 Malezas	40
2.2.6.2 Insectos, hongos, bacterias, virus, nemátodos y ácaros	41
2.2.6.2.1 Insectos	41
2.2.6.2.2 Hongos, bacterias y virus	42
2.2.6.2.3 Ácaros	43
2.2.6.2.4 Nemátodos	43
2.2.6.2.5 Otros	43
2.3 Hacer una gestión adecuada	44
2.3.1 Cuidar el momento de aplicación e intensidad en el uso de las técnicas agronómicas	44

2.3.2	Uso correcto y manutención de la infraestructura: edificios, caminos, cercos, tranques, canales, sistemas de riego, maquinaria y equipos	45
2.3.3	Cuidar los aspectos ambientales	45
2.3.4	Cuidar los aspectos sociales	45
2.3.5	Cuidar los aspectos económicos	45
2.3.6	Cuidar lo producido	45
2.3.7	Mantenerse informado	45
2.3.8	Planificar e introducir innovaciones	46
2.3.9	Mantenerse informado de la marcha del agroecosistema	46
2.3.10	Manejo del variabilidad espacial	47
3.	Estimaciones del peso de los principios en los rendimientos	49
4.	Aplicaciones	51
5.	Cuantificación del Efecto de los Principales Factores sobre el Rendimiento	57
5.1	Leyes de uso agronómico	57
5.1.1	Ley del Mínimo	57
5.1.2	Ley del óptimo	60
5.1.3	Ley de los rendimientos decrecientes	60
5.1.4	Ecuación de Baule	62
5.1.5	Ecuaciones de Mitscherlich- Baule y Harmsen, Bray y Spillman	62
5.1.6	Ecuaciones generales básicas	64
5.1.6.1	Fotosíntesis y rendimientos	65
5.1.6.2	Leyes de Ohm y Fick	70
5.1.6.3	Conceptos de balances (de masa y energía) en las cuantificaciones de las necesidades de agua, energía térmica, nutrientes y de un cultivo	72
5.1.6.4	Funciones de producción	74
6.	Modelos de Simulación	77
6.1	Introducción	77
6.2	Cómo se construye un modelo	78
6.2.1	Conceptualización del sistema	79
6.2.2	Definir las variables de estado, ecuaciones de los flujos que las modifican, parámetros y variables externas	80
6.2.3	Construcción de un algoritmo	82
6.2.4	Validación del modelo	83
6.3	Estado actual del arte y evaluación de los modelos construidos	83
7.	Conclusiones	89
	Literatura Citada	91

Resumen

Una teoría agronómica que resuma el conocimiento adquirido hasta la fecha es de gran importancia teórica y práctica por mejorar nuestra comprensión de la realidad y ser una guía para el desarrollo y perfeccionamiento futuro tanto de la misma teoría como de sus aplicaciones. El avance de las ciencias desde su infancia a su madurez sigue un camino que las lleva a pasar de un lenguaje descriptivo, de principios, a uno matemático más elegante, conciso y preciso, de leyes, para llegar finalmente a modelos que integran los conocimientos formalmente.

Esto último es lo que podemos considerar una teoría, En este trabajo, los tres principios básicos que se discuten son: 1) el uso de organismos mejorados eficientes, 2) dar a esos organismos las condiciones ecológicas adecuadas para la expresión de su potencial genético y 3) hacer una gestión adecuada. Al parecer la influencia, en los rendimientos, de cada uno de estos principios, es en promedio de aproximadamente de un 33% cada uno. La aplicación práctica de estos principios se ilustra para tres casos: 1) efecto de las tecnologías agrícolas sobre el medio ambiente, 2) como puede ayudar hacer un análisis del manejo de un cultivo y visualizar la relación entre tecnologías, 3) productos y ciencias agronómicas que las sustentan. Finalmente se comenta las leyes agronómicas enunciadas para terminar con los modelos de simulación, los tipos de ellos, cómo se hacen y se validan los modelos de simulación dinámicos, sus ventajas, sus problemas y los usos que se hace de ellos.

Palabras clave: principios, agronomía, leyes agronómicas, modelos dinámicos.

Summary

An agronomic theory that sum up the acquired knowledge up to date is of great theoretical and practical importance because it improves our understanding of reality and a is a guide to better theories and development. The advance of sciences from its beginnings to it maturity seems to follow a path that star with a descriptive language of principles to a mathematical language more elegant, concise and precise to finally arrive to models that formally integrate all the knowledge into a theory. So, the basic agronomic principles are: use efficient improved organisms, provide to these organisms the ecological conditions that are appropriate to let them express their genetic potential and provide a good management.

It seems that influence on yield of each of these principles is about 33% each. The practical use of these principles is illustrated for three cases: the environmental impact of the agricultural technologies, an analysis of the way a crop is managed and the relationship of agricultural technologies, products and agricultural sciences that sustain them. Agronomic laws and simulation models are discussed. The kind of models, the way dynamic models are build, how they are they validated, their advantage and problems, and finally the use of models are discussed.

1. INTRODUCCIÓN.

El objetivo principal de este trabajo es integrar los avances obtenidos en el campo agronómico, orientados más hacia una comprensión de los procesos medulares que de un conocimiento detallado, el que queda para el especialista en alguna de las ciencias agronómicas. Ello buscando constituir las bases de una teoría agronómica. Obviamente este es un paso inicial o un punto de partida que sin duda se perfeccionará en el futuro.

El plan a seguir es el siguiente: 1) describir los principios básicos y sus leyes, 2) dar ejemplos de usos prácticos de estos, 3) discutir algunos avances en la cuantificación del impacto de estos principios en la producción y 4) revisar que se entiende por modelos de simulación de agroecosistemas y como se hacen .

Se usará el término agronomía (derivado de la combinación del latín *ager*, campo y del griego, *nomos*, ley) en su sentido más amplio que incluye no solo el cultivo de la tierra para generar bienes derivados de vegetales, sino también para generar productos derivados de animales. Sin embargo los ejemplos que citaré serán todos del área vegetal, aunque ello no significa que estos principios no sean válidos en el área de la producción animal. De hecho lo son para cualquier actividad productiva que use organismos vivos para producir bienes.

1.1. Ciencias, Teorías y Agronomía.

Los éxitos obtenidos por diversas ciencias tales como la física o la genética, bases de desarrollos tecnológicos espectaculares, están muy relacionados con el hecho de contar con sólidas teorías. Estas representan un resumen de los avances entregados por los resultados experimentales y las inferencias o deducciones de los investigadores, hechas hasta la fecha, en una ciencia dada. Construir teorías es un juego de comprensión de datos. Es encontrar un mensaje, lo más corto posible, que al ser desempaquetado produce un modelo exacto (Wilczek, 2008).

Una buena teoría científica permite avances tecnológicos que se derivan de sus consecuencias y por ende es de enorme utilidad práctica. Un ejemplo notable de este caso es el del descubrimiento de la estructura del DNA que ha sido la base para desarrollos prácticos en numerosos campos de la biología. Además, siguiendo sus principios y leyes, los investigadores pueden avanzar sobre bases sólidas en el desarrollo de esa ciencia.

Si se compara la agronomía con el mejoramiento genético, basado en la aplicación de las leyes genéticas y actualmente iniciándose en la aplicación de la ingeniería genética, se puede apreciar que sus avances son mucho más predecibles y seguros que los avances agronómicos. Los avances logrados por los mejoradores tanto en los rendimientos como en la calidad de los granos de cultivos (trigo, maíz, arroz y otros) han sido muy estables en el tiempo comparados con los avances en aspectos agronómicos que han sido más aleatorios. Esto es atribuible a que la genética ha desarrollado una teoría y leyes que aplicadas conducen, con plena seguridad, a producir plantas y animales “mejorados”, o sea, organismos con características introducidas conscientemente que les confieren

potenciales para producir más bienes y de mejor calidad. En agronomía no existe una guía similar a la teoría genética. No existe una teoría agronómica explícita reconocida.

Quizás por eso es que en el Departamento de Agronomía de la Universidad de California, Davis, se lee que la Agronomía es la ciencia y el **arte** de producir cultivos. Es posible que en esta definición se reconozca que hay arte probablemente por falta de una buena teoría científica.

En este contexto las ciencias normalmente se clasifican en: naturales (física, química biología...), sociales (economía, sociología...) y formales (matemáticas, ciencia de la computación...). De acuerdo a lo anterior la agronomía se ubicaría más bien dentro de las ciencias naturales pero apoyándose además en las ciencias sociales y formales. No obstante, cabría preguntarse en todo caso si la agronomía es una ciencia o no.

Ciencia, *scientia* en latín, significaba sólo conocimiento hasta la Edad Media. Posteriormente pasa a significar, además, un modo preciso y normado de obtener conocimientos. Esto significa someter nuestras hipótesis a la corroboración por la vía de experimentos, o sea, al uso del método científico. Sin embargo no todas las ciencias usan la experimentación. Así, la matemática usa una metodología lógico-deductiva y la astronomía recurre a observaciones para confirmar sus hipótesis.

Si entendemos por ciencia a un conjunto de conocimientos adquiridos usando el método científico, entonces la agronomía es una ciencia ya que sus conocimientos solo son aceptados si se obtienen de siguiendo este procedimiento siendo posibles de verificar por terceros.

Si se mira la física, quizás la ciencia más avanzada en la actualidad, se puede observar que además de seguir el método científico ha establecido principios, como el de incertidumbre por ejemplo, ha recurrido al lenguaje de las matemáticas para expresar sus leyes y ha reconocido que es posible el desarrollo de teorías por el sólo uso del razonamiento (Física teórica), siempre que ellas estén de acuerdo con los resultados experimentales conocidos. Igualmente, la biología ha estado explorando activamente el campo de lo teórico y prueba de ello es la existencia de la revista como el Journal of Theoretical Biology. Igualmente existen departamentos y centros de Ecología Teórica en las universidades de Wageningen, Holanda, Lunds, Suecia, Helsinki, Finlandia, Lovaina, Bélgica, Queensland, Australia, Princeton, Stanford Universities, USA y muchas otras. También se ha formado departamentos de "System Ecology" que aplican la teoría general de sistemas y la modelación a la ecología como los de la Universidad de Estocolmo, Suecia, o de Bucarest, Rumania o la Universidad Vrije de Ámsterdam, Holanda o programas de System Ecology como el de la Universidad de Florida en USA. En general estos grupos trabajan con modelos matemáticos para resumir, cuantificar y entender problemas biológicos.

Es interesante el caso de la Ecología por ser una ciencia biológica muy cercana a la Agronomía ya que enfoca su quehacer en las interacciones entre poblaciones, no individuos, y el medio ambiente que las rodea, incluyendo en este a poblaciones de otras plantas, microorganismos, enfermedades y plagas. Se ha dicho que la agronomía es ecología más economía pero en realidad es más bien autoecología (lo que tiene la ventaja

de permitir hacer experimentos para someter a prueba nuestras hipótesis agronómicas) y más que economía es gestión (la que incluye economía, sociología y otras disciplinas atingentes).

Por ello podríamos definir a la agronomía como: La Ciencia de los Ecosistemas Agrícolas y su Gestión. Estos ecosistemas son aquellos formados, principalmente, por poblaciones de una o pocas especies, orientadas a la producción de bienes de interés humano (alimentos, energía, fibras, madera, drogas, pigmentos y otros).

Es también una ciencia integradora de conocimientos generados por numerosas disciplinas: física, química, biología, fisiología, bioquímica, genética, meteorología, edafología, patologías, bacteriología, nutrición, entomología, ecología, economía, sociología y geografía entre otras. Esta integración toma, muchas veces, información a nivel molecular, de tejidos u organismos, dándole significado al nivel de poblaciones o sea al nivel agronómico. En suma integra toda aquella información que contribuya a mejorar la agricultura.

1.2. Agricultura y Agronomía

Por otra parte, la agricultura o arte de cultivar de la tierra, el campo de aplicación de la agronomía, puede ser considerada como una forma de simbiosis que se da en por lo menos cuatro grupos de especies animales: hormigas, termitas, insectos de la corteza de la sub familia Scolitinae, y, por el hombre (Shulz y Brady, 2008). Aunque hay evidencias recientes de consumo humano de granos no cultivados procesados hace unos 30000 años atrás (Revedina et al., 2010), la agricultura hecha por los hombres aparece hace solo unos 10 mil años (Zeder, 2008, Miller, 2008, Barton et al., 2009) pero ella nació mucho antes, alrededor de 50 millones de años en el caso de algunas hormigas. Numerosas especies la practican (alrededor de 160, solo en el caso de hormigas de la tribu Attini (Shulz y Brady, 2008, Benckiser, 2010)), haciéndolo con diversos grados de sofisticación, no sólo cultivando hongos o levaduras sino también haciendo una especie de ganadería como lo es el caso de hormigas y pulgones.

Por tanto, hay diversos tipos de agricultura hecha por insectos para producir alimentos. Solo en el caso de las hormigas se reconocen por lo menos cinco tipos: el cultivo de hongos que conservan su capacidad de vivir independientemente, al parecer la más primitiva; el cultivo de hongos coral (de la familia Pterulaceae); el cultivo de levaduras; el cultivo de hongos “domesticados” o “seleccionados” incapaces de vivir independientemente pero capaces de producir hifas hinchadas que las hormigas cosechan como alimento y la de cosecha de hojas, de aparición más reciente (8 a 12 millones de años). También existe una simbiosis hormiga-pulgones en que las hormigas dan protección a los pulgones aprovechando a su vez la secreción azucarada que ellos producen y que puede ser catalogada como un tipo de ganadería hecha por insectos.

La agricultura no humana implica necesariamente un cierto conocimiento agronómico, aparentemente rudimentario, siendo un sistema muy organizado y sustentable (Benckiser, 2010). La agricultura moderna hecha por el hombre, a diferencia de la hecha por otras especies es guiada por el conocimiento científico agronómico.

Ahora bien, dado que la agricultura es hecha sólo por animales que se organizan en “sociedades”, se puede afirmar que también tiene una base social y en este sentido la agronomía comparte lugar con otras ciencias sociales.

1.3. El método científico aplicado a la agronomía.

Como en toda ciencia la agronomía usa el llamado método científico para establecer cuán buena son sus hipótesis. Para ello éstas se prueban en experimentos especialmente diseñados que deben tener los tratamientos, controles (tratamientos aplicados al azar, un mínimo de tres repeticiones y testigos lo que permite calcular el error experimental), mediciones y el análisis estadístico necesario para reducir los errores o dar por reales resultados debidos solo al azar. Este último análisis aplica la hipótesis nula, según la cual cualquier hipótesis es verdadera hasta que alguna evidencia estadística (derivada de experimentos u otra) demuestre lo contrario. Aunque la verdad de una hipótesis no se puede establecer en base a un experimento cuando la hipótesis nula es verdadera, la hipótesis es aceptada provisoriamente y se acepta mientras no se demuestre que es falsa. Pero si la hipótesis nula es falsa las probabilidades de que la hipótesis sea verdadera son despreciables. El método científico es la mejor manera para obtener conocimientos con una alta probabilidad de ser reales.

En agronomía es particularmente importante el experimento en el campo ya que es prácticamente imposible simular, hasta la fecha, en experimentos de laboratorio, cámaras de crecimiento, fitotrones o invernaderos, las condiciones que se dan en el campo. Los perfiles de viento, luz, temperaturas, CO₂ de un cultivo en el día y en la noche, en estos recintos, son muy distintos a los del campo. El experimento de campo es, por así decirlo, la prueba final de muchas hipótesis agronómicas propuestas para solucionar algún problema específico de la producción agrícola.

Así, las hipótesis relacionadas con el efecto sobre las poblaciones de plantas de: la nutrición mineral, los efectos del agua, los genomas, el control de enfermedades y plagas, la labranza de los suelos, la conservación de lo cosechado y otras, son susceptibles de ser sometidas a prueba con el método científico, el que además entrega una medición cuantitativa del efecto del factor estudiado. Solo vía los ensayos de campo es posible dar un veredicto agronómico sobre una hipótesis. Los resultados de experimentos fuera del campo son sólo provisionales teniendo la ventaja de ser más controlados, más baratos o más rápidos y si son positivos son una buena indicación de que la hipótesis sometida a prueba pueda ser cierta en el campo pero no lo garantiza. Si los resultados son negativos indican que la hipótesis no es correcta siendo innecesario someterla a un ensayo de campo. Una limitación del ensayo de campo se deriva del tiempo que toma hacer un ensayo, normalmente varios meses, lo que reduce el número de hipótesis que un investigador puede someter a prueba. Por otra parte para lograr una comprensión más profunda de lo que sucede a nivel fisiológico o edáfico u otro es necesario hacer estudios de laboratorio que son más adecuados a esos niveles de complejidad. Esto significa que toda organización que estudie seriamente problemas agronómicos debería contar con las facilidades adecuadas y necesarias para investigaciones a estos dos niveles: de campo y de laboratorio.

En general el ensayo de campo consiste en sembrar parcelas, con un mínimo de tres repeticiones establecidas en forma aleatoria, a las que se impone tratamientos de uno o algunos de los factores que se desea estudiar y otras que no reciben tratamiento alguno, las que se llama testigos. Los tratamientos generan cierta variabilidad en las propiedades de las plantas de cada parcela, rendimiento por ejemplo. Se asume que los otros factores no controlados afectan en forma aleatoria teniendo el efecto de aumentar la variabilidad de la medición hecha y afectan por igual a todas las parcelas. Cuando se sabe la forma en que un factor no controlado varía espacialmente las repeticiones se distribuyen en bloques. Esencialmente se debe establecer si las poblaciones que reciben tratamientos distintos son diferentes o no a los testigos. El análisis de varianza permite calcular las variabilidades causadas por los factores controlados, por los bloques y por los factores no controlados y se llaman efecto de tratamiento, de bloque y efecto de "error". Una forma de saber si el efecto de tratamiento es significativo es calcular la relación entre la varianza debida al tratamiento y la debida a error. Si su razón es mayor que cierto valor dado, provisto por tablas de F, según la probabilidad y a los grados de libertad, se deduce que las poblaciones que recibieron tratamiento son diferentes para esa probabilidad siendo significativo el efecto del tratamiento. Esta prueba es válida si las variables, mediciones hechas en las parcelas, se distribuyen de forma normal. Para saber si ello es así se hace una prueba de normalidad o se hace un histograma de la distribución de los datos. Si el histograma se aproxima a una curva tipo campana es normal.

Probablemente los principales problemas que dificultan la interpretación de los resultados de estos ensayos son la influencia e interacciones con la dinámica de los factores meteorológicos y biológicos, la variabilidad espacial de los suelos y condiciones sanitarias y los factores climáticos que varían de un año a otro. El efecto anual hace que sea conveniente repetir el mismo experimento por lo menos un mínimo de tres años antes de poder llegar a alguna conclusión defendible.

Es factible postular que si se pudiera medir simultáneamente, en varios lugares, los principales factores que determinan el comportamiento de cada planta de una población sería posible encontrar una función que describa las variaciones del rendimiento en función de esas variables usando el análisis multivariado. El uso de mediciones de factores de suelo y propiedades biofísicas de planta vía análisis de imágenes multiespectrales pone a disposición de los investigadores actuales una forma de hacer muchas mediciones de variables en el espacio y tiempo, con una resolución espacial prácticamente imposibles de hacer por otras vía. Los avances en el uso de drones, de cámaras digitales de alta resolución que generan imágenes multiespectrales son tan rápidos que es lógico pensar que ellas encontrarán un uso agronómico práctico en el futuro. Ello, eventualmente, podría ser una nueva alternativa para avanzar en el conocimiento agronómico

Lamentablemente, en estos días, la investigación agronómica de campo ha sido mirada como de menor valor científico y es cada día más difícil de financiar. Ello es un tremendo error que espero se corrija en el futuro. Sin investigación de campo no hay sustento adecuado para una agronomía práctica.

Los conocimientos agronómicos modernos más "duros" han provenido principalmente del uso del método científico. Este método es esencialmente útil como herramienta analítica,

pero una teoría requiere tomar esta información y reconstruir el sistema completo que se estudia. Ello quizás porque el cerebro humano funciona así, la información que le entrega los sentidos es primero analizada y luego reconstruida, (Kandel, 2006).

Este enfoque integrador, a la inversa del enfoque analítico, se encuentra primero en los modelos multivariados estáticos para estimar cuantitativamente el efecto de diversos factores fisiológicos y ambientales en la fotosíntesis, producción de biomasa y rendimientos de algunos cultivos (Saeki, 1960, Loomis y Williams, 1963, de Wit, 1965, Duncan et al, 1967, Chartier,1966,1970) y, posteriormente, en modelos dinámicos de simulación de cultivos (ej. de Wit, 1970a,b, Fick, Loomis y Williams, 1975, van Keulen, 1975, Baker, et al. 1979, Novoa y Loomis, 1981b, Novoa 1987, Richtie et al.,1985, Thornley y Johnson,1990, Liu et al, 2007a,2007b, Yang et al. 2009, Steduto et al. 2009, entre otros). También se desarrollaron modelos estadísticos que buscaban identificar y cuantificar el efecto de los factores que afectaban la producción de los cultivos. Lo anterior no significa que el enfoque integrador desplace o sustituya al analítico, llamado por algunos reduccionista, más bien la idea es que la ciencia agronómica, esencialmente integradora, avance aprovechando los resultados de ambos enfoques.

Los agro ecosistemas son sistemas complejos y por ello poseen sus características típicas: el todo es más que la suma de las partes; tienen propiedades emergentes; evolucionan; son sistemas abiertos disipativos en los que la energía y materia fluyen; funcionan fuera del equilibrio lo que requiere de fuentes continuas de energía; sus interrelaciones están regidas por ecuaciones no lineares; su comportamiento es difícil de predecir y por ello se recurre a la estadística para hacer predicciones, son homeostáticos y son auto organizados (Ladyman y Lambert, 2011) Una diferencia básica entre agro ecosistemas y ecosistemas corrientes es que en los primeros es posible identificar al ente organizador mientras que en los segundos no. En los agro ecosistemas el hombre les confiere estabilidad, capacidad para aprender en forma organizada y evolucionar más rápido.

En opinión de Fisher (2007) no se debe perder de vista el medio ambiente del campo. El enfoque de abajo hacia arriba (desde el molecular) es desafiado por la complejidad y se requiere mayor énfasis en enfoques de arriba hacia abajo que conduzcan a establecer mecanismos claves. En este sentido hay avances en el desarrollo de técnicas para determinar los componentes claves de un sistema complejo (Liu et al, 2013) que quizás puedan ser usadas aplicadas con éxito a agro sistemas agrícolas.

Las llamadas propiedades emergentes apoyan esta opinión ejemplo de las cuales se da más adelante. Estas propiedades aparecen cuando se combinan diversos elementos en un sistema y no son deducibles a las propiedades de los elementos que los constituyen, ya que probablemente resultan de sus interacciones mutuas. Un ejemplo simple es el del agua, al combinar dos gases, O_2 y H_2 , emerge una molécula con las propiedades de un líquido. Otro ejemplo simple es el de la respuesta, positiva o negativa, que emerge cuando opera un flujo de información formando un ciclo de retroalimentación (un aumento de la fotosíntesis normalmente produce crecimiento de las hojas y ello tiene como consecuencia un aumento de la fotosíntesis). Así, el comportamiento de una célula vegetal es distinto al de una planta y el de una población de plantas diferente al de una planta, en el mismo ambiente. Las propiedades emergentes crean limitaciones crecientes o condiciones

nuevas al aumentar el nivel de organización. Ello hace difícil o incompleto el enfoque desde abajo y al mismo tiempo explica como el azar y los grados de libertad, que rigen el mundo sub atómico o atómico se va reduciendo haciendo posible la aparición de leyes que rigen el comportamiento de los niveles superiores.

Sin embargo ello no implica que todas las propiedades de una población sean emergentes, ya que es posible explicar en gran medida muchas propiedades o comportamientos de las poblaciones como resultados de procesos moleculares (la fotosíntesis, la respiración o la transpiración como procesos de difusión de gases, CO₂ y agua, por ejemplo) más el efecto de la limitación biológica (resistencias: bioquímicas, del mesófilo, estomática, de las capas límites de las hojas y del cultivo, a la difusión). Desde esta perspectiva la agronomía sería la ciencia encargada de identificar, estudiar las propiedades emergentes y establecer las leyes de los agro-ecosistemas, mientras la genética, fisiología, bioquímica, química o físico-química las más adecuadas para estudios moleculares. En gran medida las propiedades emergentes de los agro ecosistemas, establecidas hasta la fecha, están resumidas en los principios mencionados que se describen más adelante.

Los sistemas agrícolas al integrar factores físicos, químicos y biológicos, humanos y socioeconómicos son de un nivel de complejidad superior a lo puramente químico, físico o biológico. Deben funcionar de acuerdo a las leyes y restricciones que rigen en cada uno de esos ámbitos, más los flujos de información (retroalimentaciones por ejemplo) y dinámica propios de su nivel de complejidad. Ello no se debe olvidar al estudiar estos sistemas. Así un químico, sin formación agronómica o ecológica, que estudie el uso de fertilizantes debe estar consciente de que no es suficiente con sus conocimientos químicos ya que la influencia de los microorganismos del suelo y de las raíces de las plantas, del hombre vía laboreo del suelo, las épocas de aplicación de fertilizantes, el manejo de residuos, el riego, etc..., modifican sustancialmente lo que sucede con los iones en el suelo. Por otra parte en el campo tanto el suelo como las condiciones sanitarias, las hídricas (lluvias y propiedades hídricas del suelo), atmosféricas (concentraciones de CO₂, temperaturas, radiación solar, humedad) son variables en el espacio (horizontal y verticalmente) y el tiempo que se deben manejar en la agronomía práctica. Estos ensayos dan pistas sobre posibles mecanismos involucrados en las respuestas observadas pero no son una herramienta que pueda sustituir a los experimentos orientados a establecer los procesos más básicos como los fisiológicos, bioquímicos u otros.

Numerosos estudios han demostrado la gran rentabilidad económica de las inversiones en investigación agronómica (Evenson et al, 2003a). No obstante, una dificultad para estimar la rentabilidad de una investigación en particular es que al hacer un análisis ex-ante de ella es muy difícil prever su real impacto. Es prácticamente imposible saber a priori que investigador va a hacer una contribución de gran impacto pero lo que sí se sabe es que sí se considera el conjunto de investigaciones siempre habrá un resultado que sea rentable y compensará los intentos fallidos. El sistema funciona a la inversa del negocio de los seguros donde muchos pagan los siniestros de pocos. En investigación pocos éxitos pagan las inversiones en muchos.

La agricultura moderna se fundamenta en la aplicación de los principios y leyes que se describe a continuación.

2. PRINCIPIOS¹ AGRONÓMICOS

Curiosamente al revisar diversos textos de agronomía es posible constatar que en ellos se hace mención a “principios agronómicos”, pero lo normal es que no se especifique cuáles son estos principios. Sin embargo, podemos decir que, en síntesis, la agronomía moderna se basa en la aplicación de los tres principios siguientes (Novoa 1986,2004):

2.1. Uso de organismos, seleccionados o mejorados, eficientes.

La agricultura hace uso de poblaciones de organismos vivos para producir, los bienes deseados. En cierto modo estos representan las máquinas usadas para transformar energía solar y elementos químicos inorgánicos de su entorno en bienes de interés humano. En gran medida la eficiencia productiva y la calidad del producto son determinadas por el organismo usado para producir. Así, las variedades o razas (factor genético) y/o las modificaciones del organismo usado para mejorar su eficiencia (técnicas quirúrgicas como podas, injertos, uso hormonas y otras) son las opciones disponibles para lograr producciones altas y de óptima calidad. Una de las principales herramientas usadas para mejorar la eficiencia productiva de los organismos usados en la agricultura ha sido la genética. Normalmente toma entre 7 y 20 años de investigación el poner un organismo mejorado a disposición de los agricultores, usando las técnicas tradicionales, lo que implica mantener activos estos programas por muchos años antes de esperar un impacto en la producción. Las mejoras en la productividad anual de los cultivos debida al mejoramiento genético han sido estimadas en 0.83% durante la década del 80 al 90 pero su impacto no ha sido igual en todos los países ni regiones. En el caso del trigo estas mejoras han sido producidas por avances en la resistencia a los polvillos y en el índice de cosecha que se produjo por la introducción de genes de enanismo (Austin et al, 1980). Al mismo tiempo los consumidores han sido beneficiados con menores precios y los agricultores sólo beneficiados cuando las reducciones de costos han sido mayores que las reducciones de precios (Evenson, 2003a, b).

Los factores genéticos y epigenéticos confieren una eficiencia intrínseca al organismo usado para producir.

El genoma, ADN, de un organismo contiene los genes que caracterizan a ese organismo. Ellos establecen la secuencia de aminoácidos que puede tener una proteína. Las proteínas pueden ser consideradas nano máquinas que forman una red compleja la cual da origen a las funciones del organismo, son las encargadas de hacer el trabajo en las células. Así, las encontramos cumpliendo funciones de catalizadores en el caso de las enzimas, estructurales, de transporte de masa (canales de iones o transportadoras de O₂, como la hemoglobina) o de información (hormonas). Además, ellas pueden actuar por sí solas o formando complejos en que se unen dos o más proteínas para cumplir una función.

¹ La Real Academia Española define principio como “cada una de las primeras proposiciones o verdades fundamentales por donde se empieza a estudiar las ciencias o las artes” y una ley como “cada una de las relaciones existentes entre los diversos elementos que intervienen en un fenómeno”

Sin embargo un gen puede dar origen a más de una proteína, uno de los procesos por los cuales se produce este fenómeno es el de modificación de la información genética llamado corte y empalme o “splicing” en inglés. En el caso del ARN puede ser una modificación postranscripcional y en el caso del ADN la unión covalente de dos fragmentos de él. La información para hacer una proteína está organizada en bloques de DNA llamados exones separados por otras secuencia de DNA llamadas intrones cuya función sería regular de la expresión de un gen, El proceso de modificación, que remueve los intrones, puede seguir caminos diferentes y así generar diversas proteínas. Por ejemplo remover uno, o dos, amino ácidos de la secuencia. Además, la diversidad de proteínas puede nacer de cambios posteriores a la síntesis de la secuencia de amino ácidos tales como adición de grupos fosfatos o sulfatos o adición de carbohidratos.

Por otra parte, en el genoma humano, se ha demostrado que los genes se encuentran generalmente en secciones separadas ubicadas en diferentes lugares de la molécula de DNA lo que requiere ensamblarlo para su traducción. Un mismo gen puede ser ensamblado de diferentes maneras, proceso llamado “splicing alternativo”, originando moléculas de RNA mensajero y proteínas que tiene funciones diferentes. Este mecanismo hace más poderosa la capacidad del genoma y le provee una gran flexibilidad (Ledford, 2008). También se sabe que solo un 1.5% del DNA humano codifica proteínas mientras que el otro 98.5% contiene secuencia regulatorias que activan o silencian genes, los cuales codifican RNA pero que no producen proteínas y otro DNA cuyo propósito todavía se está tratando de comprender (Pollard, 2009).

Además la expresión de un gen también puede ser modificada por la acción de uno o varios genes, fenómeno que se denomina epistasis.

La importancia fundamental de los factores genéticos es cada día mejor comprendida gracias a los avances en esta ciencia y la genética molecular. Esta última ha puesto a disposición de los genetistas, involucrados en el mejoramiento de especies de interés, poderosas herramientas que permiten insertar genes de cualquier especie al genoma de la especie que se desea mejorar. Ello permite, en teoría y con mayor seguridad que con las técnicas tradicionales, obtener variedades o razas mejoradas con alto potencial de rendimiento, con buena calidad, buena resistencia a enfermedades, plagas o estreses ambientales.

La opinión general es que la genética define el potencial productivo el que es modulado por los factores ecológicos y la gestión. En otros términos el rendimiento máximo está definido por la genética, si no hay limitaciones ecológicas o de gestión. La genética define la especie: su sistema de fotosíntesis (C3, C4 o CAM); el órgano de interés agronómico, que normalmente es el órgano donde la planta guarda sus reservas; su fruto (ej. si es el fruto puede ser baya, drupa, nuez, aquenio, cariósipide, legumbre, u otro), la forma de la planta, el tipo de hoja (anchas o delgadas, con o sin tricomas), sus requerimientos foto periódicos, sus temperaturas cardinales (mínima o base, óptima y máxima), la temperatura base para el crecimiento, los requerimientos térmicos de cada etapa del ciclo vital, la forma y ubicación de los estomas, la resistencia al ataque de enfermedades y plagas, el tipo de raíces (pivotante, fibrosas, adventicias), raíces con la capacidad de formar asociación simbiótica con rizobium, raíces con aerénquima que permiten soportar situaciones de suelos saturados de agua, la tolerancia a la salinidad. Mientras que el

tamaño, el color, la composición química de los órganos en cada etapa fenológica de crecimiento, el índice de cosecha, el área foliar, ángulo de las hojas, el ciclo vital y su largo, y otras características determinantes del rendimiento están bajo control genético y ambiental. La posibilidad de aumentar los rendimientos por esta vía es aún clara (Mangelsdorf, 1966) ya que en general existe variabilidad genética para muchos de los genes involucrados en el rendimiento, y con el avance de la genética molecular el número de genes posibles de aprovechar con este propósito es grande.

En el caso de la herencia epigenética se transmite información sin modificación del ADN. Los factores epigenéticos son mecanismos no genéticos que modifican de manera reversible un gen, o a las proteínas que dan origen, por la activación o la inactivación de genes como consecuencia de la interacción con el medio ambiente. Esta modificación puede ser por silenciamiento de genes o vía metilación del ADN, o fosforilación y acetilación de histonas por ejemplo. Proveen un mecanismo por el cual el genoma responde a cambios ambientales. Así algunas variedades de berros no florecen en invierno por una acción de las bajas temperaturas sobre la cromatina que silencia los genes de la floración. Estos genes son reactivados por las temperaturas más altas de primavera. Los procesos epigenéticos modulan el accionar del ADN sin modificarlo. La información epigenética puede visualizarse como un código grabado fuera del gen que la activa o desactiva un gen. En cereales la respuesta a la vernalización es mediada por la inducción del promotor Vernalización 1 que inicia el desarrollo reproductivo del ápice del tallo y se asocia a metilaciones de histonas en el gen Vernalización (Oliver et al, 2009).

Como la genética establece, el potencial productivo de un organismo es muy importante conocerlo. Éste se define como el rendimiento de un cultivar cuando crece en un ambiente para el cual está adaptado con agua y nutrientes no limitantes, con plagas, enfermedades, malezas, tendedura y otros estreses controlados efectivamente (Evans, 1993, Evans y Fischer 1999). Otra definición, más funcional, es el rendimiento obtenido cuando un cultivar adaptado es cultivado con los menores estreses posibles que se puede lograr con las mejores prácticas de manejo, (Cassman, 1999). Este es un dato fundamental cuya importancia ha sido reconocida por autores como Mitscherlich (1909), De Wit, (1965), Doorembos y Kassam, (1979), Hanson et al, (1982). No sólo porque determina el rendimiento máximo posible sino que permite visualizar el ingreso económico potencial y por ende inferir hasta qué momento es económico invertir en tecnologías para aumentar los rendimientos. Así, si este máximo fuera de 12 toneladas de grano, permite mayores gastos en tecnologías que si fuera solo 6 u 8 toneladas. Existen datos dispersos sobre los rendimientos máximos obtenidos para diferentes cultivos y en diferentes países tanto por agricultores como por investigadores. El cuadro 1 muestra los rendimientos máximos medidos y las medias mundiales producidas pudiendo apreciarse que hay un gran margen para mejorar los promedios. Se debe tener en cuenta que los valores máximos obtenidos son válidos para los genotipos, condiciones ecológicas y gestión en que fueron medidos y no puede creerse que ellos son replicables en cualquier otro lugar. No obstante lo anterior ello da una idea del gran potencial genético de cada genotipo estudiado.

Se han hecho intentos de medir experimentalmente el valor del rendimiento potencial en el campo pero dado el efecto de los factores de clima, de suelos, sanitarios u otros, es prácticamente imposible lograr las condiciones ideales de cero restricción que permitan expresar todo el potencial genético de una variedad. Así en el caso de trigo hay informes

de rendimientos en el campo de 15.6 ton/ha en Nueva Zelandia (cultivar Einstei, FAR (2010)), 18 en Chile (Hewstone, 1997), y 47,6 en cámara de crecimiento con el cultivar de primavera Yecora Rojo (Salisbury, 1991). Este último rendimiento se logró con 2000 plantas m^{-2} , concentraciones de CO_2 3.6 veces lo normal, una radiación 2.5 veces mayor a la que hubieran podido recibir las plantas de campo, sin limitaciones de agua, nutrición óptima, sin enfermedades ni plagas y con un régimen térmico óptimo. El índice de cosecha (en este caso el % de la biomasa aérea que forma el grano) fue de 0.49. Este autor encontró que la eficiencia del uso de la radiación fotosintéticamente activa disminuye cuando la intensidad de la radiación aumenta, que en el período de máximo crecimiento fue casi un 13% y, que para el ciclo completo, la eficiencia obtenida, fue sólo de 10% medición que corrobora estimaciones teóricas de esa eficiencia (Loomis y Williams, 1963, Taiz y Zeiger, 1998). Los rendimientos máximos obtenidos son muy superiores a los record obtenidos en el campo en citados en el cuadro 1. Salisbury atribuye los rendimientos más bajos medidos en los ensayos de campo a posibles estreses, menor radiación y menor densidad de plantas por unidad de superficie.

El uso de cámaras de crecimiento libres de estreses permitiría aproximarse a lograr los rendimientos potenciales genéticamente posibles como los mostrara Salisbury. Otra alternativa que parece muy promisoría para establecer el rendimiento potencial es el uso de modelos de simulación dinámicos pero, hasta la fecha, éstos no permiten el cálculo para cada variedad existente y su uso no es fácil. Ello por la complejidad de los modelos, dados los numerosos parámetros necesarios, no conocidos para todas las variedades, entre otras limitaciones.

Cuadro 1. Rendimientos producto comercial máximos medidos y promedios mundiales*, ton ha⁻¹.

Table 1. Maximun measured and world average yield of agricultural goods, ton ha⁻¹

Cultivo	Rendimiento medio mundial*	Varietad o raza	Rendimiento Máximo	% agua	Región y País	Referencia Rendimiento máximo
Arroz	4.2	Il-32A/Ming86	17,95 ¹	11	China	Longping, 2004 Bayer Cropscience, 31 Agosto 2005
Trigo	3.02	Savannah	15.36 ¹		Nueva Zelandia	http://www.fwi.co.uk/community/blogs/arablabarometer/archive/2007/11/01/world-record-wheat-yield-exposes-growing-constraints.aspx 2007
Trigo	3.02	Yecora Rojo	47,6 ²		Utah, USA	Salisbury, 1991
Maíz	5.1		23,2 ¹	13	USA	Duvick and Cassman, 1999
Sorgo	1.42					
Cebada	2.77		11.4 ¹	11		Evans, 1993
Soya	2.25	Pioneer 94M80	10.36 ¹	9	USA	http://www.pioneer.com/web/site/portal/menitem.b5db62e333774bbc81127b05d10093a0/ 2007
Caña azúcar	70.91	Co62175	110 ¹	70	Chittoor, India	http://www.atmachittoor.com/SS-Sugarcane.htm
Remolacha azucarera	53.08		157.2 ¹	75	California, USA	Rush et al. 2006
Papas	17.98		44.39 ¹	78	Nebraska, USA	Pavlista, 2002
Yuca	12.64		40.9 ¹			Nair y Unnikrishnan 2007
Maní	1.49	ICGV 87123	5.76 ¹		Timor del Este	Nigam et al. 2003
Tomates	27.29		580 ³	94	México	Cook, 2006.
Banana	19.7		60	75.5		http://www.research4development.info/SearchResearchDatabase.asp?ProjectID=2464
Nuez de coco	5.4		7		Malasia	http://diversiflora.blogspot.com/2006/01/description-mataq-hybrid.html
Alfalfa			54 ⁶		USA	USDA, 2000
Avena		S-81	69.4	10	Faisalabad, Pakistán	Naeem et al. 2006
Leche		Jersey	22330 ⁴		USA	http://jerseyjournal.usjersey.com/Article%20Archive/Production/2007/Jubilee%20Article.pdf
Huevos			361 ⁵		Holanda	http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,848100,00.html
Carne vacuno	205 ⁷		4300 ⁸			

1.- Rendimiento en el campo 2.- Cámara de crecimiento 3.- Invernadero 4.- Kg al año por vaca 5.- Huevos por gallina 6.con riego 7.- kg carne por animal 8.- kg ha⁻¹ estimados de prod. Alfalfa máxima por ha, perdida 20% pisoteo y requerimiento 10 kg alfalfa por kg carne

* Según FAO 2007-2009

Si se corrige los rendimientos por el contenido de humedad resulta que las plantas C3 producen un máximo entre 9 (papas) y 39 (remolacha azucarera) ton de materia seca por ha, las C4 entre 20 (maíz) y 33 (caña azúcar). Por otra parte para determinar la capacidad productiva de biomasa total de cada especie es necesario conocer los índices de cosecha

y si se desea expresar la capacidad productiva en términos de glucosa foto sintetizada por unidad de superficie por temporada de cultivo se debe corregir por la composición química de esa biomasa (Sinclair y de Wit, 1975).

Lo alto de los rendimientos máximos medidos sugiere que el potencial genético disponible es bastante más alto que lo que se piensa y que para aprovecharlo bien se requiere una mejor agronomía.

Tom Sinclair, en 1994, afirmaba que toda la información conocida hasta ese momento indicaba que se había alcanzado el límite de los rendimientos posibles de obtener bajo un buen manejo. Es lógico pensar que en algún momento esto sucederá irremediamente. Cassman (1999), en arroz; Rajaram y Braun (2006), en trigo en el valle del Yaqui, México; Carberry et al. (2010), en maíz de secano en Australia, entregan evidencias de este fenómeno. Sin embargo, datos de FAO sobre promedios mundiales de trigo, arroz, soya, cebada, maíz y sorgo entre 1960 y 2007 muestran los rendimientos suben con una pendiente que no muestra indicios de saturación salvo en el caso del sorgo. Tampoco hay evidencia de ello según estudios hechos en los rendimientos de trigo de North Dakota, EEUU (Underdhal et al., 2008). Otros análisis más recientes muestran que la situación depende del país. En general hay una disminución del incremento de rendimientos anuales de trigo, maíz, arroz y soja. En países industrializados los incrementos anuales del rendimiento en trigo, en los últimos años, han llegado a cero, mientras que en el caso del maíz la disminución de los incrementos ha sido menor. Por otra parte, si se mantiene el crecimiento lineal de los rendimientos anuales observado en los últimos 50 años (de 43 kg ha⁻¹) no se podrá satisfacer la demanda futura de cereales para alimentación humana, animal y biocombustibles (Fisher et al. 2009). No obstante, hay información clara asimismo de que la producción de la agricultura sigue creciendo y de que la productividad total de los factores (PTF) ha aumentado (Fuglie, 2008, 2009).

En este contexto, aunque no es clara la relación entre tasas de fotosíntesis y la productividad de los cultivos (Evans, 1975), ya que ella estaría más limitada por la capacidad de almacenaje (granos) que por otra causa (Borrás, Slafer y Otegui, 2004), parece posible mejorar la eficiencia de la fotosíntesis. El análisis de la eficiencia de uso de la radiación de trigo y maíz indican que hay margen para aumentar el potencial de rendimiento de muchos cultivos (Loomis y Amthor, 1999). Dado que la eficiencia actual del sistema fotosintetizante en interceptar radiación solar es cercana al límite teórico, el índice de cosecha de cereales del orden del 60%, cercano al límite máximo posible (Hay 1995, Austin et al. 1980) no se ve fácil el aumento del potencial de rendimiento. Sin embargo, se ha sugerido que mejorando la eficiencia de conversión de la energía luminosa atrapada en biomasa sería posible mejorar los rendimientos en el futuro. Se ha estimado que el aumento posible de esta eficiencia es de 50% como consecuencia del efecto combinado de las mejoras de la eficiencia del sistema fotosintetizante resumidas en el cuadro 2 (Long et al, 2006). De materializarse esta mejora el impacto en los rendimientos sería de un orden similar.

Cuadro 2. Resumen de los posibles aumentos en la eficiencia de conversión de la radiación solar (ϵc) que se podría lograr y tiempos estimados para la entrega de material que podría ser introducido en programas de mejoramiento genético.

Table 2. Summary of possible increases in solar radiation conversion efficiency (ϵc) that may be achieved and the speculated time horizon for provision of material that can be introduced into plant breeding programs.

Cambio	% aumento en ϵc relación a valores actuales ¹	Horizontes de tiempos estimados (años)
Rubisco con menor actividad oxigenasa y sin menor actividad catalítica	30% (5–60%)	???
Fotosíntesis C4 introducida en cultivos C3	18% (2–35%)	10–20
Mejor arquitectura del dosel	10% (0–40%)	0–10
Mayor tasa de recuperación por foto protección de la fotosíntesis	15% (6–40%)	5–10
Introducción de formas de Rubisco ² con mayores tasas de catálisis de CO ₂	22% (17–30%)	5–15
Mayor capacidad de regeneración de RuBP vía la sobre expresión de la SbPase ³	10% (0–20%)	0–5

Fuente: Long et al, 2006.

¹El valor bajo el encabezamiento “% aumento...” es la media sugerida, seguida del rango de cambios posibles calculados sustituyendo las propiedades cambiadas sugeridas en el modelo de simulación de Humphries y Long (1995).

²Rubisco: ribulosa 15-bifosfato carboxylasa/oxygenasa; RuBP, ribulosa bifosfato.

³Sbpase: sedoheptulosa-1:7-bisphosphatasa

Por otra parte estudios de los rendimientos de súper híbridos de arroz indican que su ventaja estaría en la tasa de crecimiento en los estadios medios y tardíos después de la floración por efecto de un mayor índice de área foliar y una mayor duración de la misma (Wen-ge et al, 2008).

Hay proyecciones de aumentos posibles de un 50% en la mayoría de los cultivos hacia el 2050 (Jaggard et al. 2010).

Una proyección de los rendimientos de maíz hacia el 2030 dan un rendimiento posible de 18.8 t ha⁻¹ (Calabotta 2009). Sin embargo, Monsanto proyecta aumentos de rendimiento de maíz al doble hacia el 2030 debido en 25% por una mejor agronomía, 35% por mejoramiento tradicional, 25% por transgénesis y 15% por selección usando marcadores (Edmeades et al, 2010)

Por otra parte, el caso del enorme potencial genético del trigo mostrado por Salisbury, 1991, evidencia que, actualmente, no estamos limitados por el potencial genético y que si mejoramos la agronomía y la gestión, la capacidad alimentaria de la agricultura se puede incrementar muy significativamente.

El efecto del mejoramiento genético, en el caso del trigo, no se ha debido a cambios en el potencial productivo de la fotosíntesis, sino a efectos sobre el índice de cosecha por introducción de los genes Rht1 y Rht2 que reduce el alto de las plantas provistos por la variedad japonesa Norin 10, con resistencia a enfermedades como polvillo u otras y resistencia a la tendadura (Austin et al, 1980, Hanson, Borlaug y Anderson, 1982) y en el caso del maíz a una mayor tolerancia a altas densidades de plantación, debido a hojas más erectas que reducen el sombreamiento entre plantas y dan mayor capacidad para conservar su color verde (Evans y Fisher, 1999, Loomis y Amthor, 1999).

El índice de cosecha (0.4 a 0.6 en el caso de granos de cereales) considerado de alta heredabilidad y poca sensibilidad a factores ambientales (Hay, 1995) es sin embargo afectado por factores ecológicos tales como la disponibilidad de N (van Ginkel et al, 2001) o temperaturas. Así los campesinos chilenos hablan de la “ida en vicio” que puede producir el N o las altas temperaturas refiriéndose a que se incrementa la producción de hojas y tallos en desmedro de la producción de granos en cereales y frutales. Sin embargo este efecto no se produce siempre lo que implica el impacto de otro factor no conocido. También el índice de cosecha se puede afectar por déficit terminal de agua o ataques de plagas o enfermedades durante el período de formación del producto a cosechar.

Por ende hay serios datos que indican que el potencial productivo de un cultivo puede elevarse. Además, parece posible acercarse al rendimiento potencial que tiene una población de plantas si podemos darle las condiciones óptimas a cada planta del conjunto. Una aproximación posible para resolver parcialmente este problema, en el campo, es la llamada agricultura sitio específica o de precisión la que busca manejar la variabilidad espacial del suelo, de condiciones sanitarias, nutricionales e hídricas.

2.2. Proveer condiciones ecológicas adecuadas.

El potencial genético de los organismos elegidos solo se puede expresar si las condiciones ecológicas y la gestión son adecuadas. Las condiciones climáticas, atmosféricas, edáficas, hídricas, sanitarias (plagas, enfermedades, malezas) y nutricionales que forman el entorno ecológico (oikos, palabra de la cual deriva ecología, significa casa en griego) afectan los procesos productivos y al desarrollo de la población de organismos usados. Gran parte de la agronomía consiste en dar las mejores condiciones ecológicas posibles a la especie vegetal o animal usada.

2.2.1. Condiciones climáticas y meteorológicas.

Las condiciones climáticas representan la evolución del promedio de las condiciones micro meteorológicas (definidas como aquellas características físicas que se dan en los primeros 100 metros de la atmósfera) que son de esperar en un sitio determinado a lo largo de un período de tiempo.

2.2.1.1. Condiciones de energía electromagnética.

El microclima provee los regímenes de energía electromagnética de onda corta: ultra violeta menor de 400 nm, visible o fotosintéticamente activa (RFA) entre 400-700 nm e infrarroja, sobre 700 nm, que recibirá la población de plantas cultivada. La RFA absorbida por un complejo de pigmentos entre los que destacan carotenoides, clorofila a y b, que crean una “antena” en los tejidos fotosintetizantes, principalmente hojas, para generar un poder reductor que es usado para descomponer agua, reducir CO₂ y formar glucosa. A partir de la glucosa se forman amino ácidos, lípidos y otros componentes de la biomasa vegetal. La sumatoria de la RFA a la que está expuesto un cultivo durante su ciclo vital establece un límite máximo a la producción de biomasa vegetal, el que es reducido por factores de la planta, la atmósfera, hídricos, sanitarios y otros.

Las radiaciones azules y rojas captadas por foto receptores, que consisten en una apoproteína y un cromóforo producen fenómenos llamados fotomorfogénicos. Por su parte, la radiación azul (400-500 nm) percibida produce el fototropismo, estimulando la curvatura de la planta hacia la luz por producir una distribución desigual de auxina en órganos en crecimiento la que es mayor en el lado a la sombra; inhibición del crecimiento de los tallos; regula la expresión de genes que controlan la síntesis de clorofila y flavonoides; estimula la apertura estomática vía regulación de las relaciones osmóticas de las células de guarda al activar una bomba de protones en estas células (esta respuesta sigue la ley de reciprocidad o sea responde a la dosis de luz, no al flujo o tiempo de exposición) siendo el carotenoides Zeaxantina el foto receptor involucrado. La radiación roja (666 nm) y la roja lejana (730 nm) son detectadas por el fitocromo cambiando su forma de Pr a Pfr. La forma Pfr que absorbe luz roja lejana es la forma activa que produce las siguientes respuestas: la transformación de plántulas de avenas, de etioladas a verde por efecto de la luz; controla la respuesta foto periódica de diversas plantas; promueve la germinación en lechugas; controla la transcripción de la familia de genes LHCB que codifican las proteínas que se unen a la clorofila del foto sistema II involucradas en el desarrollo del color verde; reprime la transcripción de diversos genes incluyendo el PHYA que codifica la apoproteína del fitocromo A; altera las propiedades de las membranas y la floración (Taiz y Zigers, 1998). En el caso de la floración se distingue plantas de día largo (cebada, avena, trigo, trébol, liliium spp., Beta vulgaris, espinacas, coles, rábanos), de día corto (arroz, algunas frutillas, algunos tomates) o de día neutro (maíz, Phaseolum spp., papas, tomate), según si el período oscuro (que acumula Pfr) tiene o no una duración crítica. Algunos animales como las ovejas, vacunos de carne (Yeates, 1955,1957, Glover, 2000) o de leche (aumento producción de leche en días largos) y las gallinas (aumentan producción de huevos en días largos) también son afectados por el fotoperíodo (Dahl et al, 2000).

Por otra parte, el balance de radiación infrarroja nocturno entre suelo y atmósfera, determina la temperatura del aire. La banda 8000 a 11000 nm juega un rol determinante en este balance. Ella produce la llamada “ventana atmosférica” porque la atmósfera es transparente a la radiación de esa banda. La energía llevada por la radiación de esta banda es perdida por la tierra. Como la energía aportada desde la atmósfera al suelo es poca, el balance radiativo de noche es normalmente negativo, el aire y el suelo se enfrían. Cuando este balance es muy negativo el enfriamiento es grande produciéndose

temperaturas inferiores a 0 °C o heladas. Esta condición puede afectar negativamente a los cultivos sobre todo en etapas muy sensibles tales como la floración.

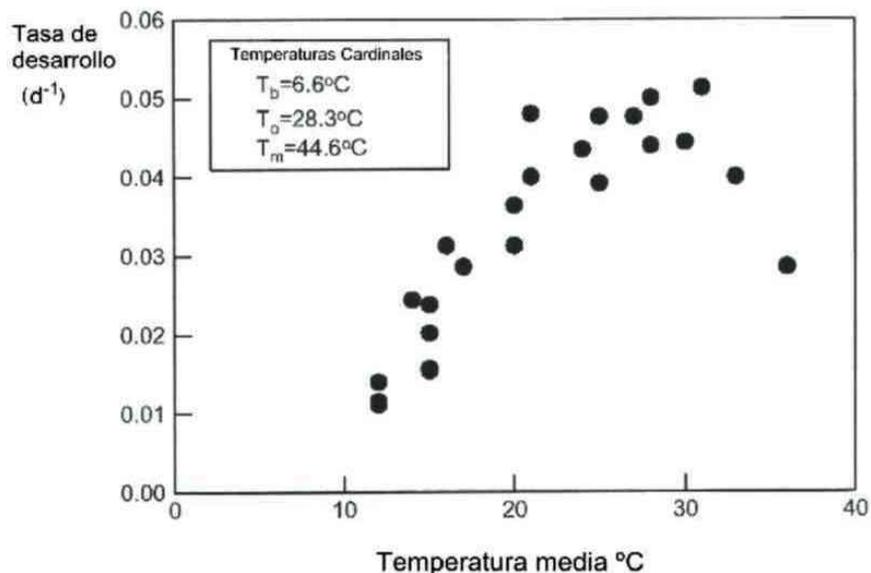
2.2.1.2. Condiciones térmicas

Las condiciones térmicas de la atmósfera y del suelo son determinantes del crecimiento y desarrollo de plantas y animales. La temperatura tiene gran influencia en la germinación, crecimiento y metabolismo de las plantas. Si es muy baja no hay germinación ni crecimiento. Sobre ese mínimo hay un efecto positivo en el crecimiento y metabolismo y sobre cierto máximo hay efectos negativos.

En general las reacciones metabólicas aumentan su tasa al aumentar la temperatura debido a que ella incrementa la energía cinética de las moléculas lo que produce mayor colisión entre ellas. En bioquímica se ha definido el llamado Q_{10} , factor que da el aumento de la velocidad de las reacciones para un incremento de 10 °C, este aumento es de 2 a 3 veces según la reacción considerada (Nobel, 1974). Normalmente es del orden de 2.2 para el caso de vegetales y temperaturas entre 10 y 30 °.

Temperaturas del aire menores a - 0.5 °C producen daño típico de días con helada a tejidos sensibles como flores, debido a la formación de cristales de hielo que al crecer rompen las paredes celulares. Normalmente cada organismo funciona (crece y se desarrolla) según una temperatura base (T_b), una óptima (T_o) y una máxima (T_m). En el caso de los cultivos y la mayoría de las plantas bajo 0° C prácticamente no hay germinación ni crecimiento. Sin embargo, dependiendo del tipo de plantas éste se inicia cuando la temperatura sube sobre el valor crítico propio de cada especie. Las de menor valor, alrededor de 5 °C, son plantas que crecen preferentemente en invierno y las otras (8 a 15 °C) en verano y sobre 18 °C plantas tropicales. La temperatura máxima tolerada se ubica entre 35 y 45 °C según la especie. Las temperaturas también afectan la tasa de desarrollo siguiendo una relación que se muestra en la figura 1, para el caso de maíz expresado en el valor recíproco de días desde siembra a inicio panoja (Craufurd y Wheeler, 2009).

Figura 1. Relación entre la tasa de desarrollo y la temperatura en maíz
Figure 1. Relationship between development rate and temperature of corn



Como consecuencia del efecto de la temperatura, mostrado en la figura 2, el desarrollo el ciclo vital de una planta se acorta al aumentar las temperaturas. Ello reduce el largo de la estación de crecimiento y la radiación absorbida con la consecuente reducción de la fotosíntesis neta total. Así, en climas de noches cálidas la respiración durante la noche es mucho más alta que en climas de noches frías y la fotosíntesis neta menor. Ello explica el porqué en Chile y otros países con días cálidos y noches frías se logran rendimientos más altos que en países de días y noches cálidas.

En este sentido, el concepto de sumas de temperaturas (ST) diarias que una planta necesita acumular para completar un período fenológico ha sido muy usado y discutido. Una de las formas de calcular esta suma es la dada por la fórmula 1: a la temperatura media (Tm) medida en un cobertizo meteorológico se resta la temperatura base (Tb) propia de cada estado de desarrollo fenológico. En principio esta suma sería específica para cada estado de cada especie y variedad de planta.

$$ST = \sum (T_m - T_b) \quad (1)$$

Si se conoce esta suma para cada estado es posible definir los días en que el 50% de la población de plantas, en un clima dado, se demorará en completar el estado correspondiente. Así, los días siembra-emergencia, emergencia-macolla, macolla-floración, floración-madurez u otros pueden ser estimados. Evidentemente los valores calculados son aproximados ya que hay otros factores que pueden afectar el desarrollo como lo son el fotoperiodo, los estados nutricionales, hídricos o sanitarios. Su uso es criticado por basarse en la temperatura media valor que puede ser igual en condiciones muy distintas. Una temperatura máxima de 30 y una mínima de 0 dan una temperatura media de 15 al igual que una máxima de 18 y una mínima de 12, siendo ambos regímenes muy diferentes.

El largo de la estación de crecimiento se puede establecer conociendo las sumas de temperaturas, para llegar a madurez a partir de la germinación, la temperatura base y las temperaturas medias diarias. Las sumas de temperaturas diarias, en días-grados, se calculan y suman. Cuando la suma llega al valor en que se acumulan los días grados necesarios para la madurez nos dan el número de días necesarios para llegar a ella y así sabemos los días que debemos usar para obtener la integral de la radiación solar durante el período de formación de biomasa.

Además, hay plantas que son estimuladas a florecer por temperaturas bajo 7 ° C, proceso llamado vernalización. En el caso del trigo invernal este requiere del orden de 800 horas bajo 7 para una buena floración. En el caso de frutales especies como la ciruela, algunas variedades de duraznos y guindas, los cerezos, los olivos, las manzanas y perales requieren de exposición a períodos de frío para florecer y por lo tanto su producción disminuye si no la tienen.

Cuadro 3: se resumen los requerimientos de frío de algunos frutales.

Table 3: Cold hours requirements of delicious fruits trees (hours < 7° C)

Especie	Mínimo	Máximo
Almendro	100	500
Arándano	700	1200
Avellano	800	1600
Ciruelo Europeo	700	1600
Ciruelo Japonés	100-600	1000
Damasco	200-500	900
Duraznero	100-400	1100
Guindo	600	1400
Cerezo	500-800	1500
Kiwi	800	1400
Manzano	200-800	1700
Membrillero	100	500
Nogal	400	1500
Pecano	600	1500
Peral	500	1500
Vid	100-500	1400

Fuente: Flores, 2007.

2.2.2. Condiciones atmosféricas.

La atmósfera provee principalmente CO₂, vapor de agua, N, ambiente térmico y eólico.

Todo el carbono que forma la biomasa vegetal proviene del CO₂ atmosférico cuya concentración en el aire influye en la fotosíntesis y tiene efecto “invernadero” por reducir las pérdidas de energía vía radiación de onda larga (alrededor de 10.000 nm) de la tierra. La actividad humana ha generado un incremento de este gas en la atmósfera lo que produce un aumento en la fotosíntesis, al incrementar el gradiente de este gas entre la

cavidad sub estomática y la atmósfera. Este hecho se ha sido demostrado últimamente en trigo, maíz y soja que han aumentado su rendimiento entre 12 y 14% (Taub, 2010).

Por su parte, las precipitaciones son la principal fuente de agua para los suelos agrícolas mientras que el contenido del vapor de agua de la atmósfera afecta la evapotranspiración (a mayor contenido menor evapotranspiración). Igualmente una mayor humedad ambiental favorece el ataque de hongos. Así, el efecto positivo del rocío (agua atmosférica condensada sobre las hojas) sobre los rendimientos se ve algo reducido por una mayor incidencia de hongos (Novoa y Letelier, 1987)

En el caso de la mayoría de los suelos una buena parte del N proviene de la fijación simbiótica y no simbiótica del N atmosférico. Otra parte del N aplicado como fertilizante y otra de la descomposición de la materia orgánica.

En cuanto a las condiciones eólicas, el viento es un factor que influye en la difusión y mezcla de gases atmosféricos, en la temperatura tanto del aire como de las superficies sobre las que fluye, además transfiere momento a la vegetación y al suelo (Thom, 1975).

El movimiento del aire reemplaza el CO₂ que extraen las plantas, transporta el vapor de agua evapotranspirada y atenúa los extremos térmicos. Por otra parte velocidades muy altas pueden provocar tendadura de cultivos como los cereales o ruptura de ramas en árboles frutales. A velocidades entre 0 y 7 km hr⁻¹, al aumentar la velocidad del viento disminuye el grueso de la capa límite (sector pegado a la hoja) donde el flujo es laminar, sin turbulencia, donde el movimiento de los gases es sólo por difusión simple debida al movimiento molecular de las moléculas. Sobre esa velocidad se produce turbulencia y el flujo de gases se incrementa porque se mueven en especie de “burbujas o vórtices” que se forman y los gases viajan en ellas mucho más rápido que por simple difusión. Por su parte el movimiento de las hojas facilita la formación de un transporte turbulento. Además transporta nubes, arena, esporas de hongos y semillas.

2.2.3. Condiciones edáficas.

Las propiedades de un suelo que afectan a los cultivos son las siguientes: pendiente, pedregosidad, profundidad (capas impermeables, napa agua, roca madre), granulometría o textura, porosidad, pH, salinidad, drenaje, fertilidad, contenido de materia orgánica, presencia de semillas de malezas, inóculos de hongos, nematodos y otras afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas.

El suelo provee básicamente:

2.2.3.1. Sostén para las plantas y animales.

2.2.3.2. Reservas de energía térmica, agua, nutrientes

(nitrógeno, fósforo, P, potasio, K^+ , calcio, Ca^{++} , azufre, S, hierro, Fe^{++} , magnesio, Mg^{++} , manganeso, Mn^{++} , boro, B, cobre, Cu^{++} , zinc, Zn^{++} , molibdeno, Mo, cloro, Cl^- y níquel, Ni^{++} . El Silicio, Si, es necesario en cereales como el trigo o avena y el sodio, Na^+ en remolacha y plantas C4) y germoplasmas tanto vegetales (semillas) como animales (huevos). Normalmente los aportes de los suelos en nutrientes principales (N, P y K) son deficitarios siendo menos frecuentes dichas deficiencias en los secundarios (Ca, S y Mg) y más raras las de los otros elementos (B, Mn, Zn, Cu, Mo, Cl, Ni y Si) llamados menores. Por ello la fertilización con N es casi siempre necesaria, seguida de la del P y luego la del K.

2.2.3.3. Un hábitat para gran variedad de organismos:

Bacterias, hongos, algas, raíces de plantas y una variada micro y meso fauna. Estos organismos hacen que el suelo sea algo más que un conjunto de materiales inorgánicos y orgánicos sometidos sólo a leyes químicas y físicas, ya que a éstas se agregan propiedades bioquímicas y biológicas que modifican su comportamiento. Así ellos descomponen la materia orgánica del suelo liberando nutrientes, quelantes, fitohormonas, enzimas y vitaminas (Altomare y Tringovska 2011).

Esta realidad no es siempre comprendida, pero es muy evidente en el caso del N, cuya disponibilidad para las plantas varía a lo largo del año como consecuencia de la actividad biológica del suelo. En este sentido, un proceso de enorme impacto en los ecosistemas y en la agricultura es el de la fijación de nitrógeno atmosférico, particularmente si pensamos que prácticamente todo el N al cual tuvieron acceso las plantas terrestres hasta el siglo XX y en gran medida hasta nuestros días, provenía de esta fijación (Zagal, 2005, Roy et al, 2006, E. Letelier, comunicación personal). De hecho los minerales que forman las rocas madres de los suelos no contienen N. El proceso de fijación de N atmosférico que es realizado por bacterias (tales con los simbiosis de leguminosas *Rhizobium* o los *Azotobacter* Cyanobacterias, *Azotobacter*, *Acetobacter*, *Azospirillum*, *Pseudomonas* y otros de vida libre) y algas azul verde es comparativamente similar o poco menos importante que la fotosíntesis. De los 275 millones de toneladas fijadas anualmente se estima que 175 millones corresponden a la fijación biológica, 70 a procesos industriales y 30 a fijación espontánea (Rodríguez et al.1984). Entre las bacterias fijadoras de N aquellas que ejecutan el grueso de esta transformación son los *Rhizobium*, bacterias que viven en las raíces de las plantas de la familia de las Leguminosas. Estas bacterias requieren de energía, para poder reducir las moléculas de N_2 atmosférico, la que es provista por carbohidratos que las plantas generan en el proceso de fotosíntesis. Al proveer N a las leguminosas los *Rhizobium* están incrementando la disponibilidad de un elemento, presente en cantidades muy limitadas en los suelos y que es esencial tanto para la formación de proteínas como para los organismos vivos. Si bien es cierto que el N es fijado en las raíces de las leguminosas, éste pasa al suelo cuando las raíces y otros órganos de éstas mueren. Por esta vía el N así fijado queda a disposición de vegetales de otras familias, mejorando su crecimiento y desarrollo. La cantidad de N posible de fijar por

un cultivo de alfalfa se puede deducir de los rendimientos potenciales de este cultivo, de su contenido de N y del aporte del suelo. Tomando datos obtenidos en la estación experimental La Platina, en un suelo mollisol, serie Santiago, donde se obtuvieron 25 ton de ms. de alfalfa con un contenido de 2,5% de N y con aportes del suelo del orden de 80 kg/ha se puede estimar que la fijación de N fue equivalente a unos 540m Kg/ha. Otras mediciones efectuadas en La Platina mostraron que trébol rosado durante dos años podía transferir 233 kg de N y proveer suficiente N como para obtener rendimientos de 56 qq/ha de maíz durante tres años (Letelier y Martínez, 1980). Esta cifra indica que la capacidad de fijación de N por esta vía es muy grande. Experimentos hechos en España muestran que es posible producir entre 10,3 y 16.7 ton ha⁻¹ de grano de maíz después de alfalfa (Cela et al., 2010).

Sin embargo, en la práctica agronómica normal, este aporte es mucho menor siendo muchas veces más fácil y más barato usar fertilizantes nitrogenados inorgánicos. Ello debido a que, generalmente, hay crecimiento de malezas en las praderas de leguminosas que usan este N fijado,

Además, de esporas de hongos patógenos para las plantas (*Gaeumannomyces*, *Phytophthora*, *Phytium*, *Alternaria*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, *Fusarium* y otros), de nemátodos (*Meloidogyne*, *Platylenus*, *Globodera* y otros) e insectos (ejem: *Naupactus* *Xantographus*, *Elasmopalpus lignosellus*, *Phylloxera* y otros) que afectan las semillas o raíces o que durante alguna fase de su ciclo, viven en el suelo. Estos patógenos y plagas significan muchas veces serios daños para los cultivos.

2.2.3.4. Una superficie de intercambio de energía

(Radiación electromagnética y térmica) y materia: gases (O₂, CO₂, N₂, vapor agua, etc.), líquidos (agua) y sólidos (polvo) con la atmósfera.

El suelo constituye una importante superficie de intercambio de radiación electromagnética entre la tierra y el sol. Un 29% de este intercambio se produce en la superficie de los suelos y el resto en la superficie de los mares, lagos y ríos. Este intercambio es responsable del calentamiento de la atmósfera en el día y de su enfriamiento en la noche y de la evaporación de agua desde los suelos (Rose, 1966, Monteith, 1973). El intercambio que se produce en aguas afecta menos la temperatura del aire porque la energía se consume principalmente evaporando el agua. El intercambio de radiación electromagnética que se produce en la superficie del suelo es en gran medida dependiente de sus propiedades ópticas: color, albedo y emisividad que a su vez determinan los coeficientes de absorción, reflexión y transmisión.

El intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera, en especial el de O₂, es de vital importancia para la vida de los organismos del suelo y de la actividad de las raíces. Así, la falta de oxígeno a nivel de raíces afecta su capacidad de absorber nutrientes y agua desde el suelo y por lo tanto su crecimiento. Una falta de oxígeno, o anoxia, provoca acidificación del citosol la que controlaría las proteínas que forman canales de agua o acuaporinas (Tuouner-Roux y otros, 2003) y reduce la respiración que genera la energía necesaria para la absorción activa de nutrientes.

En el caso de la agricultura regada, a veces, se produce un fenómeno llamado “colmataje”, que consiste en depósitos de partículas de suelo arrastradas por el agua de riego y que por un lado aumenta la profundidad del suelo pero a veces tapa sus poros provocando un “sellamiento” con la consecuencia de generar problemas de infiltración del agua y aireación.

Por último, el intercambio de sólidos entre el suelo y la atmósfera es principalmente de material particulado (polvo) formado por arenas, limos, arcillas, materia orgánica y cenizas de origen volcánico. Este intercambio es favorecido por la falta de lluvias y por los vientos. En zonas de climas áridos, con suelos secos, las partículas son más livianas y no están unidas entre sí por agua y por su tensión superficial, lo que favorece su movilidad. Al aumentar la velocidad del viento se produce transferencia de momento (velocidad por masa de partículas que se mueven) desde la atmósfera a las partículas del suelo y se generan turbulencias que favorecen el transporte de las partículas. Además, algunas actividades humanas tales como el transporte, la minería y el laboreo de los suelos son promotoras de la formación de polvo y de su transporte desde los suelos al aire.

2.2.4. Técnicas para cambiar las condiciones del suelo.

Las principales técnicas usadas para cambiar las condiciones del suelo son: el laboreo del suelo y el subsolado, los barbechos, la fertilización, el riego y la desinfección.

2.2.4.1. Laboreo suelo y subsolado

El laboreo del suelo (araduras, rastrajes) es una técnica muy usada para modificar el suelo. Los suelos dedicados a la agricultura son normalmente arados y rastreados con el propósito de controlar malezas, el daño por pájaros, mejorar el contacto entre semilla y suelo evitando su secado y facilitando su inhibición con agua asegurando, así, un buen establecimiento del cultivo sembrado.

Es común que los agricultores exageren el número de labores necesarias. Si estas labores se hacen en suelos susceptibles a la erosión, sin tomar las precauciones necesarias, el resultado puede ser la pérdida del suelo. Además el arar expone semillas de malezas a la luz lo que las estimula a germinar. Sin embargo la cero labor muestra que el laboreo convencional no es siempre necesario.

También se dice que el objetivo de la labranza es hacer una cama de semillas adecuada para su germinación. Sin embargo el advenimiento de la cero labranza ha probado que si se usan herbicidas adecuados no es necesario labrar el suelo y la erosión se reduce muy significativamente (Acevedo y Silva, 2003, Triplett et al, 2008, Reganold and Huggins, 2008). Por otra parte semillas que caen al suelo después de una cosecha son capaces de germinar, si no son comidas por los pájaros, y cuando las condiciones de humedad son adecuadas indican que es discutible la necesidad del laboreo del suelo. Además, en condiciones de invernadero es posible observar que si se pone semillas de diversos cultivos, incluyendo papas, sobre el suelo húmedo, sin presencia de pájaros, las semillas germinan y las plántulas se establecen sin problemas.

Cuando hay estratos de suelo impermeable que estén presentes se usa romperlas usando el subsolado para permitir y mejorar el crecimiento radicular.

Es también costumbre hacer laboreos algún tiempo anterior a la siembra para hacer los llamados “barbechos”, los que tienen como propósito permitir una descomposición de la materia orgánica de las malezas, la oxidación de productos de la descomposición que afectan la germinación y mejorar la acumulación de agua en el suelo. De hecho al labrar el suelo lo que se hace es inyectarle aire y ello facilita la oxidación de la materia orgánica y compuestos perjudiciales productos de la descomposición. La mayor descomposición de materia orgánica que se produce libera nitrógeno y otros nutrientes que benefician al cultivo posterior. En muchos casos este barbecho se usa para acumular agua de lluvia la que se mantiene en el suelo si no hay vegetación que transpire. Los barbechos son más efectivos en acumular agua en el suelo en climas con lluvias de verano y menos en climas mediterráneos donde las lluvias de invierno normalmente saturan el suelo. También el laboreo tiene como efecto formar una capa de suelo de propiedades térmicas menos conductoras de calor (Abu-Hamdeh, 2000) que en la noche frena el flujo de calor desde las profundidades del suelo, razón por la cual si se desea reducir el riesgo de helada, en un huerto, se recomienda no ararlo ya

2.2.4.2. Fertilización, salinidad y pH.

En general los suelos son normalmente incapaces de suministrar los nutrimentos minerales que los cultivos y praderas requieren para expresar su potencial productivo (N, P, K⁺, Ca⁺⁺, S, Fe⁺⁺, Mg⁺⁺, Mn⁺⁺, B, Cu⁺⁺, Zn⁺⁺, Mo, Cl⁻, Ni⁺⁺ y el Si necesario en cereales como el trigo o avena y el Na⁺ en remolacha y plantas C4). Los elementos más frecuentemente requeridos y en dosis mayores son el N, el P y el K. El Ca, el S y el Mg en menores dosis y los otros, llamados “elementos menores”.

La práctica agronómica desarrollada para solucionar esta limitación es la fertilización. Esta consiste en la aplicación artificial de elementos nutritivos necesarios para el crecimiento de los vegetales en dosis calculadas para satisfacer la demanda del cultivo o pradera. Las fuentes pueden ser compuestos orgánicos (guanos o estiércoles, composts, residuos vegetales descompuestos) o inorgánicos de estos nutrimentos (nitratos de N, de K, de amonio, urea, fosfatos, sulfatos de K, de Mg, de amonio, cloruro de K, azufre, borax y otros). En el caso de N y de las leguminosas se usa aplicar preparados de la bacteria *Rizhobium* para asegurar su presencia y así garantizar una buena nutrición nitrogenada.

La nutrición óptima de las plantas sería aquella que logra un balance adecuado de todos los nutrientes en cada momento del desarrollo de las plantas. El elemento a usar y la dosis se calculan apoyándose en análisis de suelos o tejido. Existen calibraciones de los análisis para afinar su status y definir las dosis a usar.

Una manera para hacer el cálculo de la dosis a usar es haciendo un balance de masa que iguala la demanda con la oferta y resulta en la fórmula siguiente, (Rodríguez, 1990, Novoa y Loomis, 1981a, Novoa 1989 a, b):

$$\text{Dosis (kg ha}^{-1}\text{)} = (D - N_s) * E_f^{-1} \quad (2)$$

Esta expresión supone, razonablemente, que el N aportado por el suelo y el aportado por el fertilizante están igualmente disponibles y que las raíces no pueden discriminar entre las dos fuentes.

La demanda (D) se calcula en base a la concentración (%) promedio, en la biomasa del cultivo considerada óptima para ese elemento y la producción de biomasa esperada.

En el caso del N su demanda (D) neta, en kg ha^{-1} es:

$$D = \text{Biomasa} * \% \text{ N, } \text{kg ha}^{-1} \quad (3)$$

Biomasa= materia seca vegetal, kg ha^{-1}

% N = Contenido de N promedio en la biomasa

Ef: Eficiencia de uso del elemento nutritivo. Es la razón $\text{kg biomasa producido kg nutriente}^{-1}$ disponible. Por su parte la eficiencia de uso del N, $\text{kg grano por unidad de N disponible}$, N suelo más N fertilizante, disminuye prácticamente linealmente de 58 a 35% al aumentar la dosis aplicada de N 150 a 300 kg ha^{-1} (Campillo et al, 2007. 2010). Este resultado implica que la eficiencia de uso, usada en la fórmula 2, normalmente disminuye al aumentar la dosis del nutriente aplicado, lo que requiere de una corrección en función de la dosis.

Ns = Nitrógeno aportado por el suelo, kg ha^{-1}

El aporte del suelo se puede estimar usando el análisis del suelo. Así, por ejemplo, valores de N, P (Olsen) y K de 40, 12 y 120 ppm son considerados, en Chile, adecuados siendo necesaria sólo una fertilización de mantención.

Si no se aplica el fertilizante nitrogenado antes de la siembra o se aplica un fertilizante cuyo N no esté disponible inmediatamente, la ecuación 2 se debe modificar ya que el aporte del suelo será $Ns * Ef$ y por ello la ecuación sería:

$$\text{Dosis (kg ha}^{-1}) = D * Ef^{-1} - Ns \quad (4)$$

Con ello, resulta una dosis mucho mayor.

Desde el punto de vista agronómico interesa conocer la eficiencia agronómica ($\text{kg grano kg nutriente}^{-1}$ aplicado) del elemento considerado. Ésta es el producto de la eficiencia por la fracción de recuperación (N absorbido por $\text{Kg kg nutriente}^{-1}$ aplicado) (Novoa y Loomis, 1981a)

Eficiencia agronómica = Eficiencia fisiológica x fracción de recuperación

Un factor importante en la absorción de los nutrientes de los suelos es la concentración en que se encuentran. A igual dosis pero con una concentración diferente (lo que se puede lograr mezclando la misma dosis con una mayor o menor capa de suelo o aplicando en bandas versus al voleo) los resultados son distintos. A mayor concentración mayor absorción, por ello su colocación en bandas es muy conveniente, además de evitar problemas de fijación como sucede con el fósforo.

Los estudios hechos para estimar la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados muestran que para el caso del N esta eficiencia es de alrededor de un 50% o menor. (Novoa y Loomis 1981a, Fernández, 1995, Campillo et al. 2007, 2010, Fageria y Baligar, 2005), Otro estudio ha concluido que la absorción del N aplicado es, en promedio, un 33% del N aplicado y solo 29% en países en desarrollo (Raun y Johnson, 1999). En el caso del N, debido al aumento de la proteína en la biomasa (van Ginkel et al, 2001, Sexton et al., 1999), a saturación del sistema de absorción radicular, o mayores pérdidas por mayor actividad microbiana en el suelo, lixiviación o desnitrificación la eficiencia disminuye al aumentar la dosis aplicada. Además, el uso de altas dosis de N puede producir la tendedad del trigo y cereales similares. En el peor de los casos la producción del trigo se puede reducir en 80% y ser de mala calidad (Berry et al. 2004). Esta es otra de las razones de porque la eficiencia del N se reduce a altas dosis de N.

Para el caso del P inferior al 10% en suelos Andisoles. Ello implica que gran parte de los elementos nutricionales aplicados como fertilizantes no son aprovechados produciendo contaminación por un lado y mayores costos por otro. Por ello parece prioritario buscar maneras de mejorar esta eficiencia. Tanto la agricultura de “precisión” o sitio específica (Haapal, 1995, Dobermann et al. 2002), el uso de fertilizantes de liberación lenta, la aplicación en bandas como aplicaciones fraccionadas en el tiempo, son técnicas de aplicación orientadas a mejorar esta eficiencia.

Desde el punto de vista agronómico lo que interesa es mejorar la eficiencia agronómica del N. Esta mejora es un desafío para los investigadores especialistas en fertilidad de suelo y, en general, para el uso de los recursos en agricultura (de Wit, 1992, 1994). Ello implica que además de las mejoras en las técnicas de aplicación, todo aumento de los rendimientos por cualquier vía que sea económica mejorará esta eficiencia. En China las eficiencias agronómicas del N medidas para el caso de maíz y trigo oscilan entre 1.3 y 14.1%, para fósforo 5 a 78.1 y para K de 3.2 a 10.2, y las eficiencias de recuperación N, P y K, para la primera estación, fueron 31.0%, 20.1% y 37.1% en trigo y 25.6%, 16.8% y 34.9% para maíz, respectivamente (Ping et al., 2009). En el cuadro 4 se da un resumen, hecho por Fisher et al, (2009), de la recuperación del N aplicado a diversos cultivos. Se puede deducir que hay una la baja eficiencia del N aplicado pero que ella es mejorable si se compara recuperaciones a niveles de agricultores con los encontrados en parcelas de investigación. Baja recuperación implica baja eficiencia.

Cuadro 4. Eficiencia de recuperación del N (RE_N , % del N aplicado como fertilizante) en cultivos bajo las prácticas actuales de producción y en parcelas de investigación.

Table 4. Mean Recovery Efficiency of N (RE_N , % of N fertilizer applied) for harvest crops under current farming practices and research plots

Cultivo	RE_N meda bajo prácticas usuales de cultivo (%)	RE_N media en parcelas investigación (%)	RE_N máxima en parcelas investigación (%)
Arroz			
• Regado	31-36 (Asia)	46-49	88
• Solo lluvia	20	45	55
Trigo			
• Regado	33-34 (India)	45-57	96
• Solo lluvia	17 (USA)	25	65
Maíz			
• Regado & solo lluvia	36-57	42-65	88

Source: Balasubramanian et al, 2004 ; Dobermann, 2007

El uso de fertilizantes de liberación lenta, la aplicación en bandas, las aplicaciones divididas en el tiempo, la agricultura sitio específica, son técnicas usadas para mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes. Es posible duplicar la eficiencia agronómica del N de 26 a 57 kg de grano por kg N mejorando su manejo (Chen et al., 2011).

La llamada agricultura orgánica propone el uso de solo estiércol, compost derivados de residuos de cultivos o praderas o cualquier otro sustrato orgánico para aportar N, P y otros nutrientes y no usar fertilizantes químicos. Un gran problema de este enfoque es que no hay suficiente materia orgánica para aplicar las cantidades de N que necesita un cultivo. Así, un cultivo que no reciba fertilizantes no produce más de 2 a 4 toneladas de biomasa por ha, debido al poco N, P y K del suelo, con un contenido de un 1% de N, si es cereal, a 2% de N, si es leguminosa o sea un total de 20 a 80 kg de N. Como para producir un rendimiento de trigo de 5 ton de grano por ha se necesita aplicar alrededor de 200 kg de N por ha se requiere cosechar entre 3 y 10 ha de cultivo para satisfacer la demanda del trigo. Ello es muy ineficiente, se pierde mucho terreno que se puede usar para producir alimentos. Por supuesto que si uno dispone de alguno de esos materiales, como puede ser estiércol proveniente de sistemas ganaderos hay que usarlo, ya que hay un nicho de consumidores dispuestos a pagar por este tipo de productos. Además hay otras inconsistencias en la agricultura orgánica como el autorizar el uso del caldo bordelés, sulfato de cobre, cal y otros productos químicos, el no usar herbicidas requiere de más mano de obra que encarece el producto (Loomis y Connors, 2002), salvo en situaciones de mano de obra barata o donde es posible el control mecánico de malezas. Igualmente, hay muchas evidencias recientes que los alimentos orgánicos no son más seguros ni sanos que los tradicionales (Wilcox, 2012). Sin embargo no cabe duda que la agricultura tradicional mal hecha puede provocar erosión y contaminación y que ello debe evitarse,

La salinidad del suelo es otro factor a considerar (Allison et al., 1954, Rhoades et al., 1999, Delatorre, 2001). Ella debe mantenerse controlada. En general se estima que valores menores a 2 dS/m no afectan mayormente a los cultivos entre 2 y 4 afecta a cultivos muy

sensibles. Si este valor sube a entre 4 y 8 es moderadamente salino, entre 8 y 16 es fuertemente salino, sobre 16 con un pH mayor de 8.5 se considera un suelo salino. Otros indicadores son el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) que si es mayor a 15% empieza a generar problemas como la dispersión de las arcillas y el RAS ($[\text{Na}^+] \left(\frac{[\text{Ca}^{++}] + [\text{Mg}^{++}]}{2} \right)^{-1/2}$) cuyo valor en suelos normales está bajo 10 pero entre 10 y 20 son dañinos.

La técnica usada para reducir la salinidad es el lixiviado del suelo con agua.

Además, los cultivos y praderas requieren un pH del suelo entre a 5.5 y 8 para crecer bien. Las correcciones del pH se hacen aplicando cal para subirlo y S para bajarlo. El uso de urea repetido disminuye el pH del suelo.

2.2.4.3. Riego y drenaje.

Se discuten más adelante, en el párrafo sobre condiciones hídricas.

2.2.4.4. Sanidad.

En el suelo se encuentra esporas de hongos, nematodos, semillas de malezas, huevos o larvas de insectos y otros animales que pueden ser perjudiciales para las plantas. Este riesgo se disminuye usando rotaciones de cultivos, solarización o aplicación de fungicidas, insecticidas, herbicidas al suelo.

2.2.5. Condiciones hídricas

Estas condiciones son determinadas por el balance entre lluvia y evapotranspiración (evaporación desde el suelo más evaporación desde las hojas o transpiración) el que es determinante de los tipos de clima y también de las necesidades de riego de las plantas. Las plantas cultivadas solo alcanzan sus máximos rendimientos cuando no sufren ningún período de estrés durante su ciclo vital. Muchas veces se cree que aquellas plantas que resisten períodos de sequía sin morir no disminuyen sus rendimientos por este factor pero, de hecho estas plantas usan la estrategia de detener su crecimiento para resistir y por lo tanto reducen siempre su rendimiento.

Cuando la lluvia es aproximadamente igual a la evapotranspiración se da la situación ideal no hay déficit ni exceso de agua y la producción no será reducida por problemas hídricos.

Si se presenta un exceso de agua sobre la evapotranspiración se puede dar una situación de anaerobiosis, ya sea para algún período o para todo el ciclo de crecimiento, que requiera drenaje para que no haya efectos sobre el crecimiento ni mermas de rendimiento. Un exceso de agua es deprimente para la producción vegetal debido a que el suelo al estar saturado de agua no permite el ingreso de oxígeno al entorno radicular lo que afecta la forma en que se encuentran los nutrientes en el suelo y la capacidad de absorción de nutrientes de las raíces. También habría acumulación de metabolitos excretados por las raíces que afectan el crecimiento, los que en condiciones aeróbicas se oxidan.

Cuando se presenta déficit de agua es necesario suplementarla con riegos. La agricultura, y por lo tanto la producción de alimentos, de grandes extensiones del mundo y de Chile es dependiente de la disponibilidad de agua dulce para riego. El área regada mundial que alcanza unos 263 millones de ha, comprende un 15% de los suelos arables y produce un 36% de los alimentos lo que implica que el control del suministro hídrico conduce a mejoras notables de productividad (Howell, 2001). Por otra parte el aumento de la población mundial y su creciente demanda de alimentos, energía, agua potable y satisfacción de otras necesidades imponen una presión cada vez mayor sobre el recurso agua y su eficiencia de uso. Además, aunque hay sectores donde las precipitaciones aumentarían, gran parte de las áreas regadas actuales sufrirán un aumento de la demanda de agua asociada al cambio climático y a contaminación por diversas vías: uso de agroquímicos en agricultura, uso doméstico, industrial y otros (Novoa, 2004).

La producción de materia seca de una población de plantas, P, es proporcional a la razón entre agua transpirada (T) y la evaporación de bandeja (Eb) (de Wit 1958):

$$P = M * T * Eb^{-1} \quad (5)$$

M : Constante propia de cada cultivo, Kg*ha⁻¹
 T : Transpiración, mm
 Eb : Evaporación de bandeja, mm

M es una constante que es característica de cada especie e independiente del clima, del suministro de nutrientes (siempre que no sea demasiado bajo) y la disponibilidad de agua (siempre que no sea excesiva) (de Wit, 1958, Viets, 1962, van Keulen, 1975).

Luego el rendimiento potencial (Yp) se puede calcular en base a esta relación, siendo:

$$Yp = IC * M * T * Eb^{-1} \quad (6)$$

IC: índice de cosecha

A partir de de las ecuaciones anteriores se puede definir la eficiencia agronómica del uso del agua (Novoa, 2004). La eficiencia agronómica se define como la producción de biomasa de un producto comercial por unidad de insumo usado por unidad de tiempo (Novoa y Loomis, 1981).

$$EAUA = IC * M * T * Eb^{-1} * (R + LL - EV - Dp - Es + \nabla H)^{-1} \quad (7)$$

EAUA: eficiencia agronómica del uso del agua, Kg de producto* ha⁻¹ * mm⁻¹.

R : Agua total aplicada por el riego, mm
 LL : Agua total proveniente de la lluvia, mm
 Es : Esguerrimiento superficial, mm
 Dp : Drenaje profundo, mm
 EV : Evaporación desde el suelo, mm
 ∇H : Variación del contenido de humedad del suelo, mm.

En esta expresión, el numerador representa el producto comercial producido deducido de la expresión dada por de Wit (1958), y el denominador el total de agua neta puesta a disposición del cultivo. El efecto del cultivo es caracterizado por los parámetros M e IC, el efecto de factores meteorológico (radiación solar, energía térmica, déficit de saturación, viento y agua lluvia) por Eb y LL, el efecto del agua de riego por R y del suelo por ∇H .

También se puede calcular Yp de la manera siguiente:

$$Y_p = EAU A * (R + LL - E_s - D_p - E_v + \nabla H) \quad (8)$$

Una relación usada para estimar el efecto del agua en los rendimientos es la siguiente (Stewart y Hagan, 1973, Doorembos y Kassam, 1979):

$$(1 - (P_a * P_m^{-1})) = K_y * (1 - (E_{Ta} * E_{Tm}^{-1})) \quad (39)$$

Pa: producción estimada, $kg\ ha^{-1}$

Pm: producción máxima, $kg\ ha^{-1}$

Ky: coeficiente de cultivo

DETa: déficit de evapotranspiración actual, mm

ETP: evapotranspiración potencial, mm

Quizás una de las principales limitaciones de estos modelos es que no son dinámicos y así el valor de Ky, por ejemplo, la sensibilidad del cultivo al déficit hídrico varía según el estado de crecimiento y el efecto sobre el rendimiento es diferente según este estado.

Por otra parte, Stewart et al., 1977, propusieron un modelo que toma en cuenta el efecto del déficit hídrico durante estados fenológicos sucesivos según la expresión siguiente:

$$Y = Y_m - Y_m ((B_v DE_{Tv} + B_p DE_{Tp} + B_m DE_{Tr}) / ETP) \quad (41)$$

Y = rendimiento del cultivo

Ym = rendimiento máximo del cultivo.

En ella B_v , B_p and B_m son coeficientes del cultivo para los estados vegetativo, polinización y madurez y DE_{Tv} , DE_{Tp} and DE_{Tm} los déficit de evapotranspiración para los mismos estados (Katerji et al., 1998).

2.2.6. Condiciones sanitarias

La presencia de malezas, insectos fitófagos, hongos, bacterias, virus, nematodos y ácaros en los cultivos y suelos son origen de serios problemas para los productores tanto por reducción de los rendimientos como por efectos sobre la calidad de los productos (Agrios, 1997).

Los efectos sobre los rendimientos a nivel de productos del conjunto de los factores sanitarios es muy variable, pudiendo oscilar entre valores inferiores a 10% a sobre 90%, ya que depende de la zona de cultivo, la presencia de inóculos, las condiciones climáticas, edáficas y el manejo entre otros.

Se estima que si no se usaran pesticidas se perdería un 70% de la producción de los cultivos (Lawrence y Koundal, 2002). Pérdidas promedio por efectos bióticos de un 23% de las producciones alcanzable en el caso de los cereales, fueron estimadas por Oerke (2006).

Resumiendo: las perdidas en cereales en base a los datos de Oerke, Fisher et al. 2009 confeccionó el cuadro siguiente:

Cuadro 5. Estimaciones globales de las pérdidas potenciales sin protecciones físicas, biológicas o químicas y pérdidas actuales, expresadas como porcentaje de los rendimientos alcanzables en trigo, arroz y maíz.

Table 5. Global estimates of potential losses without physical, biological or chemical protections and actual losses, as percentage of achievable yields of wheat, rice and corn.

	Trigo	Arroz	Maíz	Trigo	Arroz	Maíz
	Pérdidas potenciales, %			Pérdidas actuales %		
Malezas	23.0	37.1	40.3	7.7	10.2	10.5
Pestes animales	8.7	24.7	15.9	7.9	15.1	9.6
Patógenos	15.6	13.5	9.4	10.2	10.8	8.5
Virus	2.5	1.7	2.9	2.4	1.4	2.7
Totales	49.8	77.0	68.5	28.2	37.4	31.2

Fuente: Oerke, 2006, Fisher et al, 2009

Las reducciones de rendimientos en arroz, trigo, cebada, maíz, papa, soja, algodón y café causadas por las malezas se han estimado en 30%, las por insectos en 23% y las por hongos en 17%, por la empresa Cheminova (2009).

Por esa razón los países están cada día más conscientes de la importancia de la protección fitosanitaria de su agricultura e implementan medidas para evitar la entrada de plagas y enfermedades a su territorio. Esta política puede ser usada también para crear barreras no arancelarias que sirven propósitos de tipo socio-económicos además de los agronómicos.

2.2.6.1. Malezas.

Las malezas producen un daño que se ha estimado en 125 millones de toneladas de alimentos, Parker y Labrada (1996). El daño es producido por reducción del área disponible para el cultivo, efectos alelopáticos, competencia por luz, agua y nutrientes. Además, pueden ser hospederos de plagas y también de insectos benéficos.

Existen varios métodos para el control de las malezas o para reducir su infestación a un determinado nivel, entre estos:

1. Métodos preventivos, que incluyen los procedimientos de cuarentena para prevenir la entrada de una maleza exótica en el país o en un territorio particular.

2. Métodos físicos: arranque manual, escarda con azada, corte con machete u otra herramienta y labores de cultivo.

3. Métodos culturales: rotación de cultivos, preparación del terreno, uso de variedades competitivas, distancia de siembra o plantación, cultivos intercalados o policultivo, cobertura viva de cultivos, acolchado (plásticos, residuos vegetales que presentan peligro de babosas u otros) y manejo de agua (riego por goteo solo riega las plantas de interés).

4. Control químico a través del uso de herbicidas.

5. Control biológico a través del uso de enemigos naturales específicos para el control de especies de malezas.

6. Otros métodos no convencionales (ej. la solarización del suelo).

Para otros detalles ver a Martin y Zallinger. 2001

2.2.6.2. Insectos, hongos, bacterias, virus, nematodos y ácaros.

Los ataques de enfermedades y plagas producen una serie de síntomas: cambios de coloración, marchites o atizamiento de brotes o plantas, hojas y frutos manchados, defoliación, deformaciones, canchales, pudriciones de frutos, raíces y madera (Pinto, Harley y Alvarez, 1994)

Las técnicas generales de control de insectos, hongos, bacterias, virus, nematodos y ácaros son el uso de plantas con resistencia o tolerancia genética, las rotaciones, la elección del lugar de la siembra, el uso de agroquímicos, de enemigos naturales o control biológico, rotaciones, una buena nutrición mineral, desinfecciones del suelo y las combinaciones de estas técnicas llamadas "control integrado". El uso de plantas con resistencia o tolerancia genética es de gran valor por reducir el impacto ambiental que tienen los pesticidas.

2.2.6.2.1. Insectos

Los insectos (animales pertenecientes al filum de los Artrópodos) causan serios daños al alimentarse y por ser vectores de enfermedades bacterianas, a virus y por hongos. En el caso de plantas cultivadas el daño es producido por destrucción de hojas, tallos y raíces por insectos masticadores, por succión de savia por insectos chupadores y por enfermedades transmitidas por los insectos. A nivel mundial el ataque de los insectos representa un 15% de las pérdidas sufridas por los cultivos antes de la cosecha, a pesar del uso de insecticidas. El valor de las pérdidas es del orden de los 100 mil millones de dólares según dato citado por Lawrence y Koundal (2002), siendo el costo anual en insecticidas unos 8 mil millones de dólares. Además, el daño no sólo es hecho en plantas o animales vivos sino también en alimentos almacenados. Se estima que solo las pérdidas mundiales de productos vegetales en post cosecha suman un 25% del total de productos alimenticios almacenados: unas 1225 - 2300 millones de toneladas, incluyendo 600 a 800

millones de cereales y sus productos, 250 - 500 de toneladas de tubérculos y raíces y 375 – 1000 millones de toneladas de frutas y hortalizas. De este total un 20% es por efecto de insectos y ácaros lo que alcanza a unos 5 mil millones de dólares (Cao, Pimentel y Hart, 2002).

El control de insectos dañinos se basa en el uso de insecticidas en forma líquida, sólida o gaseosa, plantas genéticamente modificadas, Bt, control biológico, desinfección del suelo o rotaciones y uso de enemigos naturales (Pedigo y Rice, 2008 http://www.amazon.com/Entomology-Pest-Management-Larry-Pedigo/dp/0135132959/ref=pd_sim_b_1_#).

Los insecticidas siguen siendo muy usados pero el énfasis es hacia la búsqueda de productos químicos más amigables con el medio ambiente y los consumidores. Así, se prefiere aquellos específicos (que eliminen solo el insecto que se desea controlar y no otros) y los de menor persistencia para disminuir los efectos adversos que pudieran tener sobre los consumidores. Guías sobre el uso de insecticidas en USA detallan el uso de insecticidas sugerido a usar para numerosos cultivos (Knodel et al. 2009, Steward, Patrick y Mc Clure, 2009, Eisley y Hammond, 2007, Pennstate 2008-2009).

El control biológico de insectos está basado en el uso de enemigos naturales de los insectos o ácaros. Estos pueden ser otros insectos, hongos u otros. En el caso de áfidos se conoce muchos insectos predadores: *Chrysoperla carnea*, *C. rufilabris*, *Chrysopa* spp., *Chrysopidae* and *Haemorobiidae*, *Aphidoletes aphidimyza*, avispa parásita como la *Aphidius Coleman*, *Aphidius matricariae* y *Aphelinus mali* y diversos escarabajos *Hippodamia convergens* *Harmonia axyridis* y *Coccinella septempunctata*, algunas larvas de especies de moscas de la familia *Syrphidae* y otros. Por su parte el *Orius insidiosus* ataca áfidos y ácaros, mientras que *Stethorus Punctum* atacan a ácaros y otros coccinélidos a conchuelas. Parásitos de lepidópteros son los escarabajos *Carabidae* y *Staphylinidae*, *Actia interrupta*, avispa *Braconid* e *Ichneumon* y las avispa parásitas de huevos *Trichogramma*. Parásitos de ácaros son el *Typhlodromus pyri* recién descubierto en el 2003 muy efectivo y *Neoseiulus fallacis*. También existe hongos que atacan a insectos como *Beauveria Bastiana*, *Hirsutella*, *Verticillium lecanii* (Pennstate 2008-2009, Part II).

2.2.6.2.2. Hongos, bacterias y virus.

Los hongos cumplen funciones ecológicas positivas como la descomposición de materia orgánica al secretar enzimas digestivas y el reciclaje de nutrientes, proveen alimento y antibióticos y, en el caso de las micorrizas que forman simbiosis con las raíces (intercambian azúcares por nutrientes) facilitando la función de estas en la extracción de nutrientes del suelo.

Sin embargo también producen grandes daños a los cultivos en el campo por reducción del área foliar por manchas o defoliación, pérdidas de hojas, reducción de la calidad de los frutos por manchas y pudriciones, deformaciones de brotes u hojas, reducción del transporte de savia, destrucción de raíces (filoxera) y madera, y en el caso de productos almacenados atacados, el peligro de toxicidad debido a las aflatoxinas (Agrios, 1997).

El control de hongos se hace usando plantas con resistencia genética a los hongos, siembra de variedades que crecen en períodos en que algunos hongos no atacan o cambiando la época de siembra para esquivar el ataque, control biológico, usando fungicidas, rotaciones o desinfección del suelo en el caso de hongos del suelo-

Las principales bacterias que atacan a los cultivos son de los géneros *Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Erwinia*, *Agrobacterium*, *Ralstonia* y *Clavibacter*

2.2.6.2.3. Ácaros.

Hay numerosas especies de arañas o ácaros que producen daños a los cultivos. Su control no es posible con insecticidas. Se requiere de usar acaricidas específicos además de las otras técnicas.

2.2.6.2.4. Nematodos.

Varias especies de nematodos producen daño en raíces de plantas cultivadas. Su control se basa en rotaciones o uso de nemacidas.

2.2.6.2.5. Otros.

Enfermedades causadas por trastornos fisiológicos como escaldaduras, pudriciones o ataque de Sinfílicos.

La experiencia ha mostrado que cuando se usan pesticidas o resistencia genética u otras técnicas, en forma reiterada, para el control de problemas sanitarios los organismos patógenos desarrollan resistencia. Esta aparición de resistencia es muy conocida en salud humana en el caso del uso de antibióticos contra las enfermedades bacterianas. En el caso de una población de plantas (cultivo) ella se encuentra, en el medio ambiente, con poblaciones de organismos patógenos y lo normal es que en esa población de patógenos halla algunos individuos resistentes. Al repetirse el método de control esos organismos resistentes empiezan a aumentar en número, en parte porque los no resistentes desaparecen habiendo menos competencia y por la presión de selección que sufren. El caso de la resistencia adquirida al método de control, que sufren los cultivos, es muy conocido por los mejoradores de cultivos y los agricultores. En Chile la variedad de trigo debe cambiarse cada 5 años por esta razón. Ello obliga, muchas veces a un país, a tener un programa de mejoramiento genético que genere esas variedades. Por su parte los cultivos transgénicos también generan resistencia como se ha demostrado en el caso de variedades resistentes a insectos llamadas Bt (Tabashnik et al, 2013).

La resistencia adquirida, por los organismos patógenos, derivada del uso repetido de un método de control tiene el nivel de una ley agronómica.

2.3. Hacer una gestión adecuada.

Posiblemente un economista argüiría que el objetivo de las empresas agrícolas es generar el máximo de ingresos posibles y que por eso el primer principio agronómico debería ser este. En todo caso como es sabido el orden de los factores no es lo importante, lo medular es identificar los factores y sus impactos.

Sin embargo, no cabe duda que, humanamente e históricamente, el objetivo primero de la agricultura fue proveer alimentos para sustentar a los seres humanos. Podemos sostener que es una actividad básicamente biológica por ser una clase de simbiosis (asociación de individuos de especies diferentes que se benefician mutuamente) especializada que practican cuatro grupos de organismos vivos: hombres, termitas, hormigas y escarabajos de las cortezas. Además las condiciones ecológicas pueden incluir la influencia humana, encargada de la gestión, si consideramos que el hombre es parte del entorno que rodea los organismos usados para producir. Sin embargo si sólo se tratara de alimentar a los agricultores no se necesitaría producir un excedente de alimentos que es lo que normalmente hace la agricultura actual. La evolución de la organización social humana hizo conveniente una división del trabajo y así solo algunos hombres se dedicaron a producir bienes agrícolas mientras que otros los compraran agregándose un objetivo económico al nutricional.

Sin embargo, el contar con un organismo genéticamente modificado puestos en condiciones ecológicas óptimas es necesario pero no suficiente para lograr buenos rendimientos y éxito en una empresa agrícola. Un tercer grupo de factores que comprende, principalmente, a la influencia de los factores humano y socio económicos son determinantes para conseguirlos. Ello significa:

2.3.1. Cuidar el momento de aplicación e intensidad en el uso de las técnicas agronómicas.

Si la técnica agronómica no se aplica en el momento preciso y sin la apropiada intensidad (dosis y frecuencia de agroquímicos; frecuencia, profundidad y número de veces de las labores del suelo por ejemplo) el efecto de la práctica puede perderse totalmente o en una buena proporción. Por otra parte es conocido el efecto de la época de siembra. Para cada cultivo y clima dado hay una época de siembra óptima, si ella se adelanta o se atrasa el rendimiento se afecta sea por efectos de enfermedades, de las condiciones hídricas o las temperaturas.

2.3.2. Uso correcto y manutención de la infraestructura: edificios, caminos, cercos, tranques, canales, sistemas de riego, maquinaria y equipos.

2.3.3. Cuidar los aspectos ambientales.

El uso de agroquímico (fertilizantes, pesticidas, hormonas u otros), el laboreo del suelo debe hacerse cuidando no producir efectos adversos al medio ambiente tales como contaminación o intoxicación a aplicadores o consumidores o erosión.

2.3.4. Cuidar los aspectos sociales.

La gestión de los recursos humanos debe hacerse respetando las normas legales y de buena convivencia. Igualmente es conveniente tener buenas relaciones con proveedores, compradores y vecinos.

2.3.5. Cuidar los aspectos económicos.

La empresa agrícola es en gran medida una actividad cuya viabilidad económica es básica para su sobrevivencia. La compra de insumos, mano de obra o asesorías y la venta de productos deben ser hechas con mucha atención para lograr costos e ingresos que permitan una adecuada rentabilidad.

2.3.6. Cuidar lo producido.

Como dijéramos antes alrededor de un 25% de lo producido se pierde. Los productos agrícolas son en esencia perecibles por su naturaleza orgánica y por ser un buen alimento para numerosos insectos, hongos o ratas. Ello obliga a cuidar atentamente lo producido para evitar pérdidas innecesarias. Así las condiciones de almacenaje en bodegas y los embalajes no deben favorecer el desarrollo de estas plagas. Muchas veces es necesario aplicar fungicidas, insecticidas o raticidas para mantener a raya a estas plagas con el consiguiente aumento de costos, problemas de contaminación o calidad de lo producido.

2.3.7. Mantenerse informado.

El estar informado de: las políticas agrícolas, las nuevas tecnologías y actividades de transferencia de tecnología, sobre reuniones o encuentros comerciales, los precios, las oportunidades de nuevos mercados que ofrece el mundo actual, las condiciones meteorológicas futuras y de toda información relevante a la actividad agrícola es fundamental. En este aspecto es de gran relevancia el acceso a Internet pues hace fácil el conocer a esta información además de facilitar el uso de bancos y acelerar los contactos vía correo electrónico.

2.3.8. Planificar e introducir innovaciones.

Aunque la experiencia en el uso de planificaciones a nivel nacional o en mucho detalle no ha sido la panacea para el desarrollo que se pensó, no cabe duda que ella es necesaria. Debe ser dinámicas, o sea, cambiar en el tiempo y mas que detallada es preferible que sean estratégicas. Generalmente ello implica visualizar el posible futuro, hacer análisis de fortalezas y debilidades de la empresa, definir su misión, objetivos, metas, políticas, reglas, estrategias, programas, presupuestos y procedimientos. Actualmente es muy conveniente el compromisos con la calidad lo que implica someterse a normas como las ISO u otras similares.

Además, el introducir innovaciones tecnológicas o de gestión en la empresa es fundamental para la mantener la competitividad y sobrevivencia de la empresa.

Aunque las políticas que tenga un país para la agricultura pueden estimularla o deprimirla siendo de mucha relevancia para su desempeño, es un factor que está fuera del ámbito agronómico propiamente tal.

2.3.9. Mantenerse informado de la marcha del agro ecosistema.

Lograr los niveles de producción deseados del sistema agrícola es más fácil y seguro si hay un mecanismo de retroalimentación que informe al agricultor o agrónomo cómo va el avance de los diversos procesos, cuán buena ha sido la calidad de las técnicas de producción usadas, cómo ha reaccionado el sistema a las tecnologías usadas y de la aparición de nuevos problemas que puedan producirse (enfermedades, pestes, sequías, u otros, durante el ciclo productivo). Actualmente, esa información es obtenida personalmente por visitas al cultivo. Sin embargo el análisis de imágenes ofrece una mejor alternativa. Esta herramienta es muy poderosa porque una sola imagen multispectral puede detectar cuan bien crecen las plantas midiendo los índices de área foliar y la fracción del PAR interceptado (Law y Waring, 1994), presencia de malezas y estimaciones de la biomasa de diferentes cultivos (Quarmby et al, 1997, Akiyama and Inoue, 1996), niveles de clorofila por unidad de área foliar y deficiencias de N (Blackmer et al, 1994, Villagran y Novoa, 2002, Villagran 2003), evidencia de enfermedades (Novoa y Herrera, 2002), estreses hídricos (Clarke, 1997), detectar goteros bloqueados, fugas de agua y manejo del riego (Clarke, 1997, Bastiaanssen et al. 2000). Reducciones significativas en el uso del N y detección de aplicaciones fertilizaciones excesivas aplicadas por sistema de riego subsuperficial, en algodón cultivado, usando la reflectancia del dosel de hojas han sido logradas (Bronson et al, 2010).

Básicamente un tal sistema de retroalimentación integra información. Así, mapas de suelo junto con imágenes multiespectrales de alta resolución entregan información (reflectancia de diversas bandas de radiación electromagnética) la que puede ser usada para alimentar un modelo que entrega medidas de parámetros biofísicos del cultivo los que sirven para diagnosticar problemas, ubicarlos en el espacio, dimensionarlos y proyectar potenciales rendimientos. Estos datos pueden usarse para estimar costos y beneficios de las soluciones posibles y ser una herramienta para una agricultura sitio específico.

Para agricultores medianos y pequeños, individuales estas tecnologías pueden ser muy caras pero existe la posibilidad de asociarse de modo de abaratar su costo. Por otra parte los avances la construcción de drones y de cámaras digitales multiespectrales de alta resolución no cabe duda que harán más accesible esta tecnología.

2.3.10. Manejo de la variabilidad espacial

La agricultura sitio específica (Haapal, 1995) tiene un gran potencial para mejorar los rendimientos. Ella pretende manejar la variabilidad espacial natural que normalmente se encuentra en el campo y que es originada por las variaciones del suelo (Díaz et al.1992) y por el ataque de enfermedades y pestes. Tiene dos requerimientos: mapas del o los problemas y sistemas de aplicación adecuados. Los sistemas de información geográfica, que permiten combinar el análisis de imágenes con mapas de suelo pueden proveer este requerimiento. Un sistema de aplicación de agroquímicos puede ser más complejo. Una buena alternativa es su aplicación por medio de sistemas de riego tales como el riego por goteo que puede llevar el agua junto con el agroquímico por sectores. Es posible concebir que con el advenimiento de la miniaturización o la nanotecnología será posible controlar cada gotero del sistema de riego. La fertirrigación (aplicación de fertilizantes vía riego) y la quemirrigación (aplicaciones de insecticidas, fungicidas y reguladores de crecimiento) ha sido probada con éxito (Ghidiu, 2010). Este sistema que requiere de inversiones tiene la ventaja de reducir los peligros de toxicidad para los aplicadores. Este sistema requiere de inversiones adicionales para comprar e instalar los medidores de iones u otras sustancias pero tiene la ventaja de ser más preciso y de reducir el peligro de toxicidades que puedan sufrir los operarios al momento de aplicar insecticidas o fungicidas. Es concebible que con los avances en la mico miniaturización o las nanotecnologías sea posible controlar cada gotero de un sistema de riego.

Los principios enunciados en los párrafos anteriores no sólo son aplicables a la Agricultura sino a todo sistema productivo de bienes que sean generados por organismos vivos tales como la Piscicultura, la Silvicultura, la Apicultura, la Olericultura, la Hidroponía u otro.

Además, si se sigue estos principios es posible lograr altos rendimientos, productos de buena calidad, conseguir tener una empresa rentable y económicamente sólida.

3. ESTIMACIONES DEL PESO DE LOS PRINCIPIOS EN LOS RENDIMIENTOS

Dado el gran número de factores distintos involucrados en la generación del rendimiento, la influencia de cada uno debería ser muy baja si todos tuvieran el mismo peso, pero ello no es así.

Si se asume que estos tres grupos de factores: genéticos, ecológicos y de gestión, son todos los factores involucrados en los rendimientos y, tienen pesos similares, cada uno de ellos afectaría, en promedio, los rendimientos en un 33.3%.

El efecto del mejoramiento genético en mejorar la productividad de los cultivos es muy conocido (Evenson y Gollin, 2003 a,b). Se ha estimado que este ha aumentado los rendimientos de maíz en un 50%, en soja un 85%, en trigo un 75% y en algodón un 24%, (Thirtle, 1985). No obstante lo anterior, de acuerdo a otros autores el factor genético es responsable de alrededor de un 50% de los aumentos de rendimientos observados en trigo y maíz, pudiendo que este efecto sea mayor en el futuro, siendo el resto atribuido a factores ecológicos (Hewstone, 1997, Duvick, 2005). Este valor de 50% es el obtenido en condiciones experimentales y no considera el efecto de la gestión, ya que ella es estándar y hecha por los mejoradores. Por otro lado, un estudio hecho en el Valle del Yaqui, México, entre 1968 y 1990 mostró que el aumento de rendimientos de trigo, a nivel de agricultor, debido al mejoramiento genético fue de 28%, un 48% debido al mayor uso de N y un 24% a otros factores (Bell et al. 1995). También hay evidencias, en estaciones experimentales, de aumentos de rendimientos debidas al mejoramiento genético de entre 20 y 35% en tabaco (Babcock y Foster, 1991).

A nivel predial es posible que algún factor ecológico, por ejemplo el N, esté limitando en mucho los rendimientos. Igualmente, limitaciones de P, K, agua o debidas a plagas, enfermedades o malezas pueden reducir los rendimientos en más de un 100%. Así, los estudios hechos sobre fertilización de cultivos muestran que lo normal es que el N que provee el suelo, en Chile, sea de solo un 25 a 30% del necesario para obtener los rendimientos promedios de trigo de riego (6 toneladas por ha) y menos de un 10% del necesario para satisfacer la demanda del rendimiento máximos de este cereal mostrados en el cuadro 1.

El efecto debido a las mejores prácticas de gestión ha sido estimado en 50% (Duvick, 2005), en el caso del maíz.

Diferencias entre los rendimientos promedios obtenidos por los agricultores y el potencial de esa zona puede ser una indicación del efecto del manejo. Este es de 25% en Inglaterra en el caso del trigo y de 15% en el caso del arroz en Egipto Fisher et al. (2009). Lobell et al (2009) citado por Fisher et al. (2009) dicen que una diferencia de 25% o menos en el rendimiento a nivel de granja con el máximo alcanzable puede representar el nivel óptimo de producción. Ello reconocen que el riesgo y las incertidumbres en las tomas de decisiones de los agricultores puede elevar esta diferencia, en especial bajo condiciones de secano.

Otras estimaciones de estas diferencias son 50% en el valle del Yaqui, México, 70% en Japón y 58 a 100% en Luzón para el arroz y en el caso de maíz va de 48% en Iowa a más de 200% en la región sub-sahariana (Fisher and Edmeades, 2010). Las diferencias mayores en los países menos desarrollados puede deberse a la menor educación y capacitación de los agricultores.

El Instituto Internacional para el Manejo del Agua (2007) estimó que el 75% del aumento en la producción de alimentos que se reunirá en el futuro se podría lograr si los agricultores con bajos rendimientos fueran llevados a alcanzar el 80% de los rendimientos de los productores más eficientes. En Uganda, se estima que, rendimientos de 1 a 2 ton de grano por ha pueden ser llevados a 6 a 8 toneladas con un buen manejo. Igualmente, la Unidad de Manejo y Desarrollo del Agua de FAO (Water Development and Management Unit) cree que mejorar la eficiencia del uso del agua sería menos útil que elevar el ingreso de los agricultores con bajos rendimientos a niveles de los rendimientos alcanzados por agricultores más eficientes (Marris, 2008).

Un análisis sobre el efecto de los grupos factores que disminuyen los rendimientos potenciales de una variedad en un clima dado, según Fairhurst y Witt, 2002 y Roy et al., 2006, son:

- Rendimiento posible 80% del potencial. 20% menos debido a que económicamente no es rentable invertir para lograr 100% del potencial.
- Rendimiento posible 60% del potencial. Otro 20% adicional al anterior menos si solo N, agua y gestión son adecuados.
- Rendimiento posible solo 40% del potencial. Otro 20% menos adicional al anterior si se aplica poco fertilizantes y se hace una mala gestión.

4. APLICACIONES

Como se expresara anteriormente: una teoría debe ser útil. Los ejemplos siguientes tienen como objetivo indicar cómo se puede usar esta teoría y dejar establecido que es una herramienta que **permite un análisis agronómico sistemático**. Se puede dar muchos ejemplos de su utilidad pero solo se da tres: uno en el ámbito del impacto ambiental, otro en de la producción y otro en el de las ciencias agronómicas.

En el cuadro 6 podemos ver cómo los principios agronómicos se pueden desglosar, relacionar con técnicas agronómicas específicas e identificar el impacto ambiental posible de cada técnica. Ello es de mucha utilidad para enfrentar las técnicas de mayor impacto y según ello priorizar o cambiar las técnicas para reducir el impacto ambiental de la agricultura.

Cuadro 6. Principios agronómicos, técnica asociada y los riesgos ambientales de ellas.
Table 6. Agronomic principle, associated technique and their environmental risks.

PRINCIPIO	TÉCNICA	RIESGOS AMBIENTALES
1. USO DE ORGANISMOS EFICIENTES	Variedad o raza mejorada	Bajo a mediano
	Podas	Ninguno
	Injertos	Ninguno o bajo
	Reguladores de crecimiento	Ninguno o bajo
	Hormonas animales	Medio a Alto*
2. PROVEER LAS CONDICIONES ECOLÓGICAS ADECUADAS		
• CLIMÁTICAS	Especie, variedad o raza	Bajo
	Época de siembra	Ninguno
	Invernaderos	Bajo
	Corta vientos	Ninguno
	Heladas	Bajo
• EDÁFICAS	Nivelaciones	Bajo
	Labranza y barbechos	Bajo a Alto*
• NUTRITIVAS	Enmiendas	Ninguno o bajo
	Fertilizantes minerales	Bajo a Alto*
	Abonos orgánicos	Bajo a Alto*
	Concentrados	Ninguno
• HÍDRICAS	Riego	Ninguno a Alto*
	Drenaje	Ninguno
• SANITARIAS	Herbicidas	Bajo a Medio
	Insecticidas	Bajo a Alto*
	Fungicidas	Medio a Alto*
	Nematicidas	Medio*
	Acaricidas	Bajo a Medio
	Control biológico	Ninguno o bajo
	Vacunas	Ninguno o bajo
	Remedios (antibióticos)	Bajo
3. HACER UNA GESTIÓN ADECUADA		
• APLICACIÓN DEL ENFOQUE DE SISTEMAS	Momento del uso técnica	Ninguno
	Intensidad o cantidad	Bajo a Alto*
	Rotaciones	Ninguno
	Control integrado de plagas	Ninguno o bajo
	Reciclaje residuos	Ninguno o bajo
	Modelos simulación	Ninguno
• CUIDAR LOS ASPECTOS ECONÓMICOS	Planificación, implementación del plan, control, contabilidad.	Ninguno

<ul style="list-style-type: none"> • MANTENERSE INFORMADO De los precios, mercados, desarrollos tecnológicos, aspectos legales, créditos, etc. 	Uso Internet, radio, prensa ITT	Ninguno
<ul style="list-style-type: none"> • CUIDAR EL MANEJO DEL PERSONAL 	Capacitación Bienestar	Ninguno
<ul style="list-style-type: none"> • INFRAESTRUCTURA Y EQUIPOS 	Edificios	Ninguno
	Maquinaria	Ninguno a Alto*
	Equipos	Ninguno a Alto*
<ul style="list-style-type: none"> • CUIDAR LO COSECHADO 	Bodegas	Ninguno o bajo
<ul style="list-style-type: none"> • CUIDAR LOS ASPECTOS AMBIENTALES 		Ninguno

- Impacto negativo alto cuando son mal usados

Es posible que el calificar como bajo a mediano el peligro de usar variedades mejoradas sea criticado por algunos por su efecto negativo sobre la biodiversidad. La importancia de la biodiversidad está en que ella es una fuente de genes, proveería estabilidad al ecosistema, y en muchos casos mejora la estética del paisaje. No cabe duda que es una fuente de genes y belleza pero los argumentos relacionados con la estabilidad son cuestionables porque hay ecosistemas muy estables que son prácticamente un monocultivo como el caso de los bosques de coníferas (Colinvaux, 1982) y agro ecosistemas muy estables como el caso del cultivo de arroz en Vietman y maíz en otros países.

La importancia de la biodiversidad en la estabilidad de un ecosistema se basa en la idea que en una red a mayor número de vías alternativas mayor es su estabilidad. Sin embargo el matemático Dietrich Braess, encontró que agregar capacidad extra a una red puede, a veces, reducir su eficiencia global. Igualmente Colinvaux (1982) opinó que lo que sucede en una red eléctrica donde si una mayor diversidad da estabilidad, es muy distinto a lo que pasa en una red trófica. La estabilidad del ecosistema debería ser mayor en climas menos estables ya que las especies menos tolerantes al cambio se eliminarían y así el ecosistema se adapta a esa situación cambiante reduciendo sus especies a solo aquellas que toleran cambios. Hay opiniones que sostienen que una gran biodiversidad no es algo tan deseable que deba defenderse a toda costa por ser una respuesta al cambio y los cambios siempre se están produciendo (Lovelock, 2006). La mayor biodiversidad en esta tierra parece darse en los climas tropicales, relativamente estables, de regímenes térmicos e hídricos favorables para la vida en contraste con climas polares fríos de mucha menor biodiversidad aunque también relativamente estables. Ello parece indicar que donde las condiciones para la vida son favorables y estables se da la mayor biodiversidad probablemente porque esas condiciones permiten que un mayor número de genomas se expresen, hay una presión de selección menor, a la inversa que en climas menos favorables o menos estables

El rol agronómico de la biodiversidad ha sido discutida por Hillel y Rosenzweig, (2005), ellos discutieron la dependencia de la agricultura de la biodiversidad, la biodiversidad en el suelo, el cambio climático y la biodiversidad de la agricultura y la conservación de la biodiversidad para sustentar la producción de alimentos.

En el cuadro 7 podemos ver un ejemplo de su uso para orientar a un agrónomo o productor sobre qué hacer o corregir de lo que se está haciendo y tomar decisiones. En el

fondo ello permite hacer un análisis agronómico de una explotación particular. Aún cuando todos estos principios se enseñan, no se organizan en forma sistemática con el objeto de hacer un análisis que permita orientar y tomar decisiones. El cuadro se puede perfeccionar a gusto del usuario, por ejemplo: agregar el momento de la aplicación de cada técnica, los insumos, la mano de obra necesaria, las jornadas maquinaria requerida y costos asociados para generar un cronograma e incluir un análisis económico e indicadores como el TIR y VAN del cultivo.

Cuadro 7. Lista de comprobación uso de los principios agronómicos para el caso de la producción de un cultivo anual en un predio.

Table 7. Check list of agronomic principle use in the case of an annual crop.

PRINCIPIO.	PREGUNTA	SI/NO	RECOMENDACIÓN
1.- Uso Organismo eficiente	¿Usa una variedad eficiente?	No	Cambiar cultivo o variedad
2.- Proveer las condiciones ecológicas adecuadas			
Climáticas Hídricas Térmicas	¿El clima es adecuado para el cultivo o variedad?	No	Cambiar cultivo o variedad Cambiar o mejorar sistema de riego Estudiar uso sistema de protección
	¿Riega?	Si	
	¿Hace bien el riego?	No Si	
	¿Sumas temperaturas adecuadas? ¿Sufre de heladas?	Si Si	
Edáficas Drenaje Labranza Nutritivas	¿Es el suelo adecuado?	Si	Modificar sistema de labranza
	¿Necesita drenaje?	No	
	¿Se preparó bien el suelo?	No	
	¿Hace análisis de suelo o foliar?	Si	
Sanitarias: Malezas	¿Controla las malezas?	Si	Cambiar herbicida
	¿Usa el herbicida adecuado?	No	
Sanitarias: Enfermedades	¿Tiene enfermedades? ¿Las controla bien?	Si Si	
Sanitarias: Plagas	¿Sufre plagas?	Si	
	¿Las controla bien?	Si	
3.- Hacer una gestión adecuada			
Momento e intensidad del uso de la técnicas	¿Aplica las técnicas en el momento adecuado?	Si	Ajustar dosis (semillas, agroquímicos) o número de plantas o intensidad (número y profundidad labores suelo)
	¿Con la debida intensidad?	No	
Mantenerse informado	¿Está bien informado?	No	Mejorar acceso a información
Cuida los aspectos económicos	¿Lleva registros de ingresos y gastos?	Si	
Cuidar manejo del personal	¿Maneja bien a su personal?	Si	
Infraestructura y Maquinarias y equipos	Mantiene bien los edificios, caminos, canales, etc....	Si	Mejorar mantención
	Mantiene sus máquinas	No	

Cuidar lo Cosechado	¿Cuida lo cosechado?	Si	
Cuidar los aspectos ambientales	¿Se preocupa del deterioro ambiental?	No	Cambiar técnicas que afecten al medio ambiente

En el cuadro 8 se presenta otra aplicación de los principios esta vez relacionada con las tecnologías, productos y ciencias agronómicas. Ello permite visualizar las ciencias agronómicas que requiere conocer un agrónomo y las que debería enseñar una escuela de agronomía. Obviamente antes de las Ciencias Agronómicas se requiere el conocimiento de ciencias básicas como las matemáticas, la biología, la física, la química.

Cuadro 8. Principios agronómicos, tecnologías, productos y ciencias agronómicas vinculadas.

Table 8. Agronomic principle, technology, goods and agronomic sciences.

Principio Agronómico			
	Tecnología	Producto	Ciencia Agronómica
1.-Uso Organismos eficientes			
	Cultivar o raza	Semilla Reproductor Hormonas	Mejoramiento genético Fito o Zootecnia Fisiología Vegetal o Animal Fitotecnia
	Poda o injerto	Porta injerto	Fisiología Cultivos
2.- Proveer Condiciones ecológicas adecuadas			
Climáticas	Cultivar o raza	Semilla Reproductor	Agro meteorología Ecología Agrícola
Hídricas	Riego Drenaje	Sistemas de riego Sistemas de drenaje Equipos de riego	Agro meteorología Edafología Riego y drenaje
Edáficas o Alimentarias	Fertilizantes Henos, Concentrados Praderas	Fertilizantes y abonos Henos, concentrados Pastos	Edafología Fertilidad de suelos. Nutrición mineral de cultivos Alimentación animal Praderas
Sanitaria: Control Enfermedades	Fungicida Bactericidas Control Biológico	Fungicidas Antibiótico Virus, bacterias	Fitopatología Patología animal Ecología Agrícola
Sanitaria: Control Plagas	Insecticidas, Acaricidas, Nemacidas. Control Biológico	Sustancia orgánica Predadores de plagas	Entomología Agrícola Nematología Ecología Agrícola
Sanitaria: Control Malezas	Mecánico Herbicidas Control Biológico	Herramientas o equipos Sustancia orgánica Insectos, hongos, bacterias, virus	Malherbología Ecología Agrícola
3.- Hacer una Gestión adecuada			
Momento e intensidad del uso de la técnicas	Todas	Todas	Todas
Mantenerse informado		Libros, revistas, folletos Radio, TV, Internet	Todas
Cuidar la administración y los aspectos económicos		Balances, precios, bases de datos	Economía Agrícola Administración Rural

Uso del enfoque sistémico	De la información	Modelos	Informática, Programación Fisiología de plantas y de cultivos, Ecología Agrícola
Cuidar manejo del personal			Administración Rural
Cuidar infraestructura y Maquinarias y Equipos		Edificios, caminos, canales, embalses Maquinaria Equipos y Herramientas	Construcciones Agrícolas Riego Maquinaria agrícola
Cuidar lo cosechado		Bodegas, frigoríficos	Fisiología, Post cosecha
Cuidar los aspectos ambientales	Agroquímicos Terrazas, cultivos en fajas, Cero labranza.	Agroquímicos no contaminantes, Abonos, enmiendas.	Ecología Agrícola, Fertilidad suelos, Conservación Suelos

Otros usos posibles de estos principios son el servir de base para establecer los departamentos básicos de una institución de investigación agronómica, hacer un análisis agronómico de los requerimientos de un país frente al cambio climático y muchos otros tópicos en los que sea necesaria una opinión agronómica como lo es la eficiencia del uso del agua (Novoa, 2004).

Los principios anteriores son sólo descriptivos y definen los factores determinantes de la producción pero no consideran la estimación cuantitativa de los efectos que tienen los diversos actores en la producción en los rendimientos.

5. CUANTIFICACIÓN DEL EFECTO DE LOS PRINCIPALES FACTORES SOBRE EL RENDIMIENTO.

Parece normal que las ciencias comiencen por establecer sus principios y leyes en prosa y que avancen hacia expresarlos en lenguaje matemático. Ello tiene la ventaja de establecer sin ambigüedades cuales son los factores determinantes, permitir calcular sus efectos posibilitando, así, hacer pronósticos de rendimientos y cálculos económicos. El curso histórico de los intentos de cuantificación en el ámbito de la agronomía es similar al del sufrido por la Física. Ésta, al igual que la agronomía, empezó por hacerlo en algunos ámbitos de ella y luego los ha ido integrando en la búsqueda de la unificación de todos ellos. La Física es considerada la ciencia que más ha avanzado en este proceso.

El interés en cuantificar el efecto de los diferentes factores sobre los rendimientos de los cultivos, explotaciones ganaderas o forestales es muy antiguo. Los primeros en proponer formas de cálculo fueron químicos, luego le siguieron estadísticos, economistas, expertos en riego, fisiólogos, ecólogos, agrónomos, eco-fisiólogos, agro-meteorólogos y más recientemente los modeladores de cultivos.

Por otra parte, el uso de los ensayos de campo iniciado en el siglo 19 permitió empezar a cuantificar en forma científica la agronomía. De hecho fue en Rothamstead, famosa estación de Investigación Agronómica inglesa, que R.A. Fisher alrededor de 1925 ideó el llamado análisis de varianza, desarrolló los conceptos que permitían establecer si dos poblaciones eran similares o no aplicándolos al análisis de los resultados en los experimentos de campo en su libro *Statistical Methods for Research Workers* (Métodos estadísticos para Investigadores). Ello permitió incrementar la rigurosidad de los análisis de los resultados de experimentos de campo y fue una demostración clara de los beneficios que la cuantificación podía tener en la investigación no solo agronómica sino biológica cuando se trabaja con poblaciones.

5.1. Leyes de uso agronómico.

Es posible que dado el gran impacto de los nutrientes y del agua en los rendimientos, sean estos los primeros factores cuyos efectos hayan sido cuantificados y expresados en lenguaje matemático

Siguiendo la información resumida por Villasmil (1973) y otros, la evolución de este proceso es la siguiente:

5.1.1. Ley del Mínimo.

Es, quizás, la ley agronómica más antigua y conocida, enunciada por Liebig en 1843, según la cual el rendimiento, Y , está determinado por la cantidad del elemento nutritivo que se encuentre disponible en la menor cantidad (X). En el fondo esta ley deriva de la ley de conservación de la masa. Si se hace un balance de masa no cabe duda que la máxima formación posible de biomasa, de una composición química dada, estará determinada por

la cantidad de aquel elemento necesario para formarla, que esté disponible en menor cantidad. Así si la biomasa formada debe tener un 1% de N y se dispone de 100 kg de este elemento solo se podrá generar 10.000 kg de biomasa.

En otros términos, Y es proporcional a X.

$$Y = k * X \quad (9)$$

Esta es la ecuación de una recta, k es la pendiente o constante de proporcionalidad, unidades de Y por unidad de X. Esta constante no es la misma para todos los 17 elementos nutritivos mencionados en el párrafo 2.2.4.2, ni para un mismo elemento en todos los cultivos, debido a que ella depende del elemento considerado y de la composición química de la biomasa que se forme.

La fórmula 9 permite que haya rendimientos infinitos, lo que no es real. Solo es correcta al inicio de la curva respuesta y cuando los otros factores no sean limitantes.

Según Salisbury (1991), Víctor Shelford en 1913 generalizó la ley de Liebig proponiendo que cada especie vegetal es capaz de existir y reproducirse exitosamente sólo dentro de un cierto rango de condiciones ambientales.

Al empezar a aumentar el elemento que esté al mínimo pueden suceder por lo menos cuatro cosas:

- Este elemento deja de estar al mínimo, y otro lo reemplaza pasando a ser el factor limitante.
- Aumenta el almacenamiento o reserva del elemento, en la planta, sin efecto en los rendimientos. Hay evidencia, por ejemplo, que *Arabidopsis*, acumula nitratos en sus vacuolas (De Angeli et al., 2006).
- Produce cambios metabólicos que afectan el rendimiento. Es conocido el caso del aumento de la síntesis de proteínas al aumentar el suministro de nitrógeno y en ese caso el rendimiento de azúcares disminuirá ya que los esqueletos carbónicos que requieren las proteínas son proporcionados por carbohidratos. Ello reduce la producción de biomasa ya que la formación de un gramo de proteínas requiere más glucosa que la producción de un gramo de almidón u otra azúcar de reserva (Penning de Vries et al., 1974). Por ello el rendimiento, puede disminuir al almacenarse más proteínas o aceites. En el caso de la remolacha azucarera se controla el suministro de N para maximizar su rendimiento de azúcar. Ello tiene otra consecuencia: la respuesta al N pasa de ser lineal a curva. También es conocida la interacción negativa de un exceso de Cu con la absorción de Fe.
- Se pueden empezar a producir efectos negativos por aumento de la concentración del elemento en cuestión. En el caso de elementos menores es muy fácil que esto suceda.

Aún así, dadas estas limitaciones, es importante retener que esta ley es válida dentro del rango bajo de la curva respuesta.

Si bien es cierto esta ley se enunció para el caso de los elementos nutritivos (N y otros) no cabe duda que ella se puede ampliar pudiendo aplicarse a otros factores (agua y radiación, por ejemplo) que afectan a los rendimientos. Siempre será el factor más limitante el que determine la formación de biomasa posible en un momento dado.

Desde un punto de vista fisiológico Blackman (1905) postuló que la tasa de fotosíntesis, primero y principal proceso generador de biomasa, era limitada por la más lenta de sus etapas, en cualquier circunstancia. Generalizando, la tasa de cualquier proceso metabólico estaría limitada por la más lenta de sus etapas.

En otras palabras, cuando un proceso es influido por varios factores su tasa está limitada por aquel factor que esté al mínimo. Es similar a la ley del mínimo pero con la diferencia que se aplica a las tasas. Pero como las tasas son función de las concentraciones o cantidades de un elemento disponible es otra forma de la ley del mínimo. Lo adicional es que amplía el tipo de factor, no sólo se aplica a un elemento nutritivo material sino también al efecto de la disponibilidad de energía (solar o bioquímica) o la conductividad estomática o anatómicos como la superficie foliar u otros que limiten la tasa.

Modificando la expresión 2 para evitar que el rendimiento se pueda hacer más alto que lo potencial posible, es conveniente definir la relación siguiente:

$$Y \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} = Y_p \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} * (a/ap) \quad (10)$$

Donde Y_p es el rendimiento potencial posible, ton^{-1} , al valor del factor que esté al mínimo y a_p la cantidad de ese factor necesaria para obtener el rendimiento potencial. En el caso de las tasas de los procesos metabólicos de biosíntesis las concentraciones de los elementos nutritivos son determinantes. Estas cantidades están determinadas por aquellas concentraciones celulares de los elementos en cuestión que sean necesaria para que la tasa de síntesis de la sustancia, que contengan ese elemento, sean las óptimas para el funcionamiento de la célula. Estos valores pueden estar dados por el K_m (constante de la ecuación de Michelis-Menten que describe la cinética enzimática y que da una idea de la afinidad de la enzima por el sustrato a mayor valor menor afinidad y es la concentración de sustrato para la cual se obtiene la velocidad máxima de la reacción) de las enzimas que participan en la biosíntesis correspondiente, si como se ha sugerido. A este valor la enzima funciona a su máxima eficiencia. Sin embargo los K_m medidos varían bastante debido probablemente a la presencia de diferentes enzimas que hacen el mismo trabajo o a isoenzimas con diferentes K_m y porque cada enzima requiere de cofactores específicos diferentes. Así, para el caso de la reducción de nitratos el K_m medido, en raíces de maíz, fue de 0.3 para el caso de la glutamato dehidrogenasa y 0.07 mM para la glutamina sintetasa, requiriendo NADPH como dador de electrones la primera y NADH la segunda que es la más común en plantas superiores. Redingbaugh y Campbell (1981); encontraron 0.3 mM en raíces de maíz, Wray y Fido (1990); 0.013-0.018 mM en hojas espinaca, 8 -10 mM, en *Erythrina senegalensis*, Stewart y Orebamjo (1979).

La ecuación 10 da valores más reales sólo si se usa para períodos de tiempo cortos probablemente minutos u horas, ya que el factor limitante normalmente varía con el tiempo (Loomis y Connors, 2002).

5.1.2. Ley del óptimo

Otra ley agronómica, muy poco conocida, es la llamada “Ley del Óptimo”, posiblemente derivada de la ley del mínimo. Según esta “un factor que está en su nivel mínimo contribuye más a la producción mientras más cercanos a su nivel óptimo estén los otros factores de producción” (Liebscher, 1895). Ello se debe a que al corregir el factor que está al mínimo es normal que aparezca otro factor que pase a ser el que está al mínimo, pero en menor grado, lo que impide que la respuesta al primer factor sea la que corresponde.

Si se consideran los resultados obtenidos de experimentos factoriales N, P, K realizados para conocer las respuestas a estos elementos nutritivos, es normal encontrar lo que los estadísticos llaman “interacciones”. Esto es el aumento de la pendiente de la curva a un elemento cuando se aumenta simultáneamente otro u otros. Ello se puede entender si se aplica la ley del óptimo y se considera la dinámica de la situación que se puede producir. Así, el factor que está al mínimo en un momento dado, nitrógeno o agua por ejemplo, dejará de estarlo si se aplica N o agua al sistema y algún otro factor pasará a estar al mínimo, si éste se corrige puede aparecer un tercero. En realidad lo que se está modificando es la producción máxima de posible, en ese sitio, la que al elevarse aumenta la pendiente de la curva respuesta al primer facto, esto es: una interacción positiva.

Las interacciones negativas, cuando al adicionar el segundo elemento la pendiente de la curva disminuye, pueden deberse a diversas causas. Una de ellas es cambios en el tipo de sustancia almacenada (por ejemplo más proteínas al aumentar el N suministrado), generación de problemas osmóticos en casos extremos, desbalances nutritivos o antagonismos entre nutrientes.

Esta ley está confirmada totalmente, con algunas reservas en el caso del control de plagas, enfermedades y malezas. Por ello los recursos productivos son usados más eficientemente con el aumento de los niveles de rendimientos debido a la optimización de las condiciones de producción. Por ello una investigación estratégica que sirva tanto a la agricultura como al medio ambiente no debe estar dirigida tanto a la búsqueda de retornos marginales sino al mínimo de cada recurso productivo que sea necesario para permitir una utilización máxima de todos los otros recursos (de Witt, 1992).

5.1.3. Ley de los rendimientos decrecientes.

Mitscherlich, a inicios del siglo 20, propuso la llamada ley de los rendimientos decreciente. Ella establece que los rendimientos se incrementan cada vez menos al aumentar la dosis aplicada de un nutriente hasta llegar a un rendimiento máximo. Fue un avance sobre la ley del mínimo, que no establece límite al rendimiento. Entonces el rendimiento estaría dado por la siguiente ecuación:

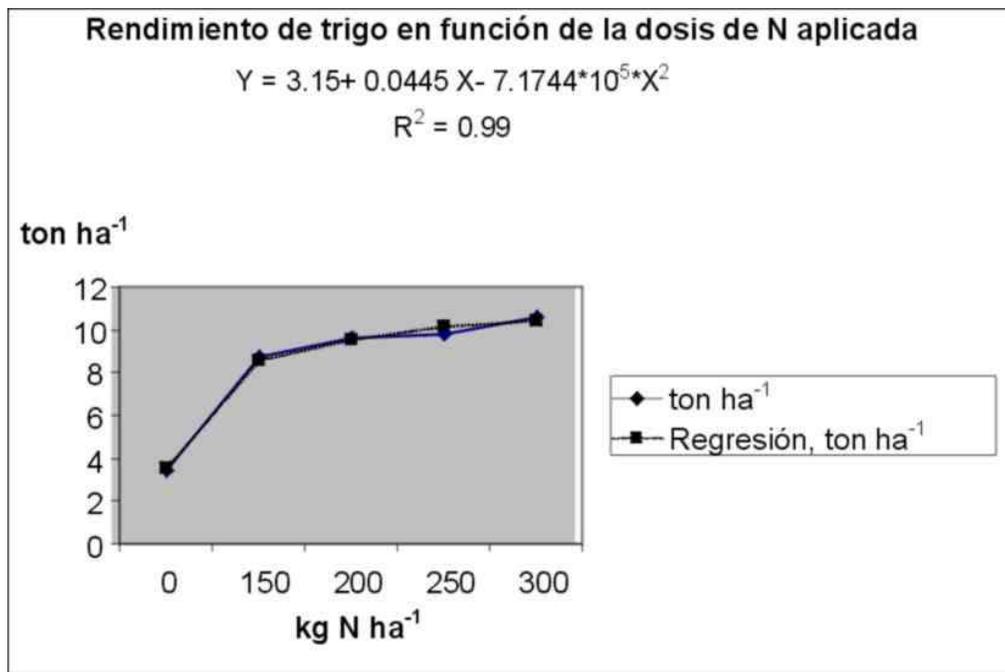
$$Y = A * (1 - 10^{-cx}) \quad [\text{masa} * \text{área}^{-1} * \text{tiempo}^{-1}] \quad (11)$$

donde:

A, Rendimiento máximo posible,
c, constante de proporcionalidad o coeficientes de “actividad”
x, cantidad del factor cuyo efecto se está determinando.

En este caso el rendimiento Y se aproxima a A de manera asintótica. Así, el incremento en Y es cada vez menor, por unidad de x, al aumentar x. Por ello se le llama ley de los rendimientos decreciente. El gráfico 1 muestra un ejemplo para el caso de un cereal cuyo rendimiento máximo es 10.6 ton ha⁻¹.

Figura 2. Rendimientos de trigo en función de la dosis de N aplicada.
Figure 2. Wheat yields at increasing N rates.



Fuente: Campillo et al., 2007

La disminución del incremento de los rendimientos o cambio de la pendiente puede ser atribuible a la aparición de algún factor limitante.

Mitscherlich modificó su fórmula inicial para incluir a más de un nutriente: N,P y K., lo que resultó en la expresión siguiente (Voortman R.L. y J. Brouwer, 2001).

$$Y = A (1 - \exp(-a_1N)) (1 - \exp(-a_2P)) (1 - \exp(-a_3K)) \quad (12)$$

Otra modificación que incluye la estimación del aporte del suelo es:

$$Y = A - (A - Y_0) \exp(-cx) \quad (13)$$

Siendo Y₀ el rendimiento cuando x = 0, o sea el rendimiento que se produce sólo con el aporte del nutriente del suelo.

5.1.4. Ecuación de Baule.

Por su parte, Baule en 1917, propuso la fórmula siguiente:

$$Y = A - A(1/2)^{bu} \quad (14)$$

Donde bu : unidad Baule o cantidad de nutriente que aumenta el rendimiento (Y) en 50% de la diferencia entre el rendimiento posible y el actual. Si se agrega una segunda unidad Baule se obtendrá un aumento máximo posible del 75%. Al considerar el caso de dos elementos: una unidad Baule de P y 2 de K , por ejemplo, y aplicar el concepto de Baule se obtiene el efecto de interacción $0.5 \cdot 0.75 = 0.375$ y no 0.5 si se aplicara la ley del mínimo.

5.1.5. Ecuación de Mitscherlich- Baule y Harmsen, Bray y Spillman

Combinando las ecuaciones de Mitscherlich y Baule (Voortman y Brouwer, 2001; Finger y Hediger, 2008) se obtiene:

$$Y = A (1 - \exp(-a_1 - a_2N)) (1 - \exp(-a_3 - a_4P)) (1 - \exp(-a_5 - a_6K)) \quad (15)$$

Una aplicación de la ecuación de Mitscherlich-Baule al caso de la producción de secano que es afectada por la disponibilidad de agua y nitrógeno, es la propuesta por Harmsen (2000 a,b).

$$Y = Y_a - Y_a \exp(-c_{a,t} N_t/Y_a) \quad (16)$$

Donde Y es el rendimiento (kg de grano por ha por año), Y_a es el rendimiento potencial (kg de grano por ha por año) en función del agua disponible y $c_{a,t}$ el coeficiente de actividad, una medida de disponibilidad del N , dependiente de la humedad asociado al N . Siendo N_t la suma del N del suelo más el N del fertilizante. Según esta ecuación es la relación N_t/Y_a , no el N_t , la que determina la absorción de N bajo condiciones de agua limitantes. Pero por ser difícil de evaluar ya que Y_a y $C_{a,t}$ son funciones desconocidas de la humedad, la ecuación anterior se modificó para permitir su evaluación a:

$$Y = Y_a - Y_a \exp(-c_{ns} N_s + c_{nf} N_f) Y_a^{m-1} \quad (17)$$

Donde:

c_{ns} y c_{nf} son los coeficientes de actividad de un nutriente del suelo y del fertilizante.

m es una constante. Para el caso del nitrógeno: si $m-1 = 0$, no hay dependencia del agua porque ella no es limitante y se obtuvo un valor optimizado de $m-1 = -0.7$ (Harmsen, 2000b). Un gráfico de los R^2 (obtenidos para las regresiones entre los rendimientos calculados Y vs los rendimientos potenciales Y_x) versus m da una curva parabólica con claro máximo para el valor $m-1 = -0.7$. Para el caso del P da valores de $m-1$ optimizados de 0.4.

Por su parte Bray (1920) introdujo el concepto de movilidad y opinó que la ley del mínimo era más aplicable a elementos móviles y que el concepto de Mitscherlich se aplicaba

mejor a elementos inmóviles. La respuesta de las plantas a un elemento móvil sería lineal y curvilínea a uno inmóvil. Así, las plantas responden proporcionalmente al total de un elemento móvil presente y en función de la concentración del elemento inmóvil presente. Una modificación de la ecuación de Mitscherlich propuesta por Bray es la siguiente.

$$\text{Log}(A-Y) = \log A - c x_s - c_1 x \quad (18)$$

Siendo c la tasa de conversión por unidad de índice del elemento x en el suelo, x_s y c_1 la eficiencia del método de aplicación y x la cantidad del elemento aplicado en fertilizante agregado al suelo.

Por su parte, Spillman, 1923, propuso la relación siguiente cuando se aplica más de un nutriente:

$$y = A (1-R^{n+a}) (1-R^{p+b}) (1-R^{k+c}) \quad (19)$$

A: límite del rendimiento alcanzado cuando se incrementan a , b y c

a , b y c : unidades de N, P_{2O5} y K_2O aplicadas

n , p y k : unidades de N, P_{2O5} y K_2O disponibles en el suelo antes de la aplicación.

R: razón de la serie de incrementos.

Las ecuaciones mostradas anteriormente no son todas las propuestas sino las más conocidas. Sin embargo no se ha generalizado su uso. Un problema con ellas son los parámetros que usan. Ellos no han sido estudiados o si lo han sido no se han publicado por lo que es difícil saber si ellos son o no dependientes de los suelos o clima.

Como hemos visto, tanto en los modelos nutricionales como en los basados en el efecto del agua, un dato muy usado es el rendimiento máximo. Ello sugiere que una estrategia lógica sea el estimar primero este valor derivándolo de consideraciones fisiológicas sobre el potencial fotosintético de una población de plantas para las condiciones de radiación y temperatura de la zona y período del año donde se esté cultivando, luego ir reduciendo este valor de acuerdo a las condiciones ecológicas y a la gestión que se esté haciendo. Desde el punto de vista práctico profesional y dada las dificultades de establecer con precisión este rendimiento parece mejor suponer, como dato, un rendimiento máximo esperado y a partir de él estimar las cantidades de nutrientes necesarias para obtenerlo. Una estrategia posible es usar el rendimiento que se ha tenido y a este agregarle un 20 o 30% o más adicional y a partir de ese hacer los cálculos. Parece poco probable que el rendimiento se pueda subir demasiado con solo aumentar la dosis de un fertilizante ya que son mucho los factores que lo determinan. Si no se logra ese rendimiento se deberá a otros factores, no a los nutricionales.

5.1.6. Ecuaciones generales básicas.

En términos generales y de acuerdo a los principios enunciados anteriormente el rendimiento (Y) sería una función de factores genéticos, factores ecológicos y factores asociados a la gestión:

$$Y = f(\text{fgen}, \text{fec}, \text{fges}) [\text{masa área}^{-1}] \quad (20)$$

Otra forma de expresar el rendimiento (Y) es definirlo como una función del rendimiento potencial agronómico (Yp) de un genotipo, de factores genéticos (fgen y fgenop), de factores ecológicos (fec y fecop) y de factores asociados a la gestión (fges y fgesop) y aplicar la ley del mínimo que se discute más adelante.

Fgen, fec y fges son los factores existentes en un momento dado y fgenop, fecop y fgesop son los mismos factores cuando están en su nivel óptimo.

$$Y = Yp * \text{Min} [\text{masa área}^{-1}] \quad (21)$$

Min es el factor que está al mínimo de los cocientes siguientes: $\text{fgen} * \text{fgenop}^{-1}$, $\text{fec} * \text{fecop}^{-1}$, $\text{fges} * \text{fgesop}^{-1}$

El rendimiento potencial agronómico se puede definir como la producción de un cultivar en un medio ambiente para el que es apto, por unidad de área por estación de crecimiento o ciclo productivo, obtenido bajo condiciones óptimas de crecimiento: sin limitaciones de agua, plagas, enfermedades u otros factores limitantes posibles (Evans y Fischer, 1999). El potencial de rendimiento de un cultivo en un sitio es el rendimiento teóricamente posible para una cantidad de radiación absorbida y una composición química dada, difiere del rendimiento potencial construyéndose en base a reacciones bioquímicas y estequiometrias conocidas (Amthor, 2007) y no deben confundirse.

Dado que los sistemas agronómicos ocupan áreas de suelo y micro climas no homogéneos, hay una variación espacial a considerar y, como son dinámicos, hay un efecto del tiempo. Así, el factor que está al mínimo varía con el tiempo por efecto del clima, de factores sanitarios, riegos, nutricionales u otros y por ello la ecuación 21 es aplicable solo a periodos de tiempo cortos y para un punto dado en el espacio dificultando su aplicación para predecir fácilmente los rendimientos. Sin embargo estas variaciones son cada vez más estimables usando modelos de simulación dinámicos acoplados a sistemas de información geográfica que permiten correr el modelo en el espacio (Hodson y White, 2010, Dadhwal, 2003, Sing et al., 1993).

Lamentablemente no es posible resolver aún las expresiones 20 y 21. La dificultad nace de no conocerse con precisión las funciones componentes de cada uno de los grupos de estos factores, del conocimiento del rendimiento potencial posible, parámetros biofísicos del cultivo o ambientales. En la práctica, no ha sido posible reproducir experimentalmente y en forma precisa las condiciones a que está sometida una población de plantas, ello quedó claro cuando se comprobó que los invernaderos, fitotrones o cámaras de crecimiento no pueden simular los perfiles de viento o de gases o de temperaturas que se dan en el campo.

En algunos casos el factor más pequeño puede ser el genético, en otro de alguna de las condiciones ecológicas, en otro de algún factor de gestión. Por otra parte hay efectos sinérgicos y circuitos de retroalimentación que complican la estimación del efecto de cada uno de estos grupos de factores. Además, un control de malezas, el control de una plaga, el riego o la aplicación de un fertilizante son mucho más efectivos si se hace en el momento adecuado que en otro. La dinámica del proceso productivo afecta el impacto del factor considerado y de la práctica cultural aplicada.

Como veremos más adelante los avances cuantitativos más sólidos, se han hecho principalmente en el cálculo de los efectos de algunas de las condiciones ecológicas básicas sobre los rendimientos, sin considerar efectos genéticos o de gestión.

5.1.6.1. Fotosíntesis y rendimientos

No cabe duda que el proceso fisiológico básico principal generador de biomasa vegetal es la fotosíntesis. La formación de biomasa de una población de plantas deriva principalmente de la tasa de formación de carbohidratos (a partir de los cuales se sintetiza proteínas, lípidos, ácidos orgánicos, compuestos orgánicos secundarios), de la respiración, de la absorción de agua y minerales del suelo. Se ha propuesto varias alternativas para estimar Y_p a partir de la fotosíntesis. Esta se estima como función de la radiación solar y sus eficiencia de uso o calculado la fotosíntesis neta como un flujo neto de CO_2 desde la atmósfera al cultivo usando la ley de Fick o la de Ohm para simular el flujo de CO_2 o como función del agua de la transpiración y del agua disponible o a partir de la eficiencia de uso del agua.

En principio, la fotosíntesis neta, FN, de un cultivo determina el potencial máximo de acumulación de carbohidratos de un cultivo y a partir de ellos es posible estimar la biomasa posible de generar si se conoce cuál será su composición química. FN se define como la diferencia entre la fotosíntesis bruta (FB) menos la suma de la respiración de crecimiento (R_c) más la respiración de mantención (R_m) o sea como la diferencia entre un flujo de CO_2 dirigido hacia las plantas, dado por la fotosíntesis y otro emitido por las plantas que es generado por la respiración.

$$F_n = FB - (R_c + R_m) \quad (22)$$

Se ha estimado que para un período de crecimiento estacional R_m es aproximadamente igual a R_c (Loomis y Amthor, 1999), luego para ese período:

$$F_n = FB - 2 R_c \quad (23)$$

R_c se puede calcular de la composición química de la planta siguiendo a Penning de Vries et al. 1974. También se pueden estimar de la composición elemental de la biomasa (Mc Dermitt y Loomis, 1981; Lafitte y Loomis, 1988).

Por lo tanto si se calcula la FN, se conoce la composición química de la biomasa y el índice de cosecha, existe una base para estimar la producción potencial de un cultivo.

Por su parte la FB se ha propuesto calcularla usando la eficiencia con que ella atrapa la radiación solar.

Podemos definir la eficiencia global de la fotosíntesis como:

$$\text{Efg RFA} = \text{Energía atrapada} \cdot 100 \cdot \text{Eula} \cdot \text{energía incidente}^{-1}. \quad (24)$$

EfgRFA = eficiencia global de la radiación fotosintéticamente activa.

Eula eficiencia de uso de la luz atrapada.

Así, la cantidad de radiación solar que cae en un área dada pone un límite máximo posible a los rendimientos cuando no hay otras limitaciones. De acuerdo al Ciclo de Calvin la reducción de una molécula de CO_2 a CH_2O requiere de 2 NADPH y 3 ATP. Para generar los dos NADPH se debe mover 4 electrones, desde el agua al NADPH, lo que necesita de 8 fotones, con energía equivalentes a las de un fotón de 680 y otro de 700 nm según el esquema Z de la fotosíntesis. La fotólisis de dos moléculas de agua, en el lumen del cloroplasto, genera 4 electrones y 4 H^+ . Por otra parte hay otros 8 protones movidos por estos 4 electrones y el citocromo b_6f , ubicado entre el PII y el PSI, desde el estroma al lumen. Estos 12 protones al salir del lumen al estroma por la ATPsintetasa, según mecanismo propuesto por Mitchell, forman tres ATP dado que para formar una molécula de ATP se requiere 4 H^+ (Taiz y Seiger, 1998).

Como la energía del quantum de 680 nm es 42,04695 kcal por Einstein o mol de fotones y la energía de 700 nm es 40,8456 kcal por Einstein, se requiere 82.8925 kcal por electrón movido. Como es necesario mover 2 mole de electrones para producir 1 mol de NADH, se necesita 165,785 kcal por mol reducido.

La biosíntesis global de glucosa se ha establecido como:



Por lo tanto por mol de glucosa formado se necesita 12 NADH_2 (24 electrones = 48 fotones = 1989 kcal) y 18 ATP pero como se forman 48 ATP (la fotofosforilación requiere 14.1 kcal/mole, Nobel, 1974) al producirse los 12 NADH_2 sobran 30 ATP (219 kcal).

Así, la energía atrapada por la fotosíntesis sería la energía libre contenida en una mol de Glucosa (686 kcal) + la disponible en 30 ATP (219), 905 kcal.

Además, se estima que solo un 75% de la luz absorbida es aprovechable en el proceso siendo el resto disipado como calor ya que los fotones de largos de onda menores a 680 que son canalizados al PSII contienen más energía que la necesaria y hay pérdidas cuando los electrones pasan de un estado foto excitado triplet a los niveles transicionales (Conn y Stumpf, 1972).

$$\text{EfgRFA} = 905 \cdot 0,75 \cdot 100 / 1989 = 34.12\% \quad (25)$$

Otra estimación da una eficiencia teórica máxima de la fotosíntesis de un 31% de la energía absorbida basada en que la energía libre atrapada es 477 KJ por mol de CO₂ reducido, que las energías de los 8 fotones de 680 nm y de 700 nm absorbida es de 1400 KJ y que la eficiencia de conversión de la energía del ciclo de Calvin es de 90%, bajo condiciones óptimas (Whitmarsh y Govindjee, 1999).

Por otra parte, si se considera que, de la energía total incidente en un cultivo durante su ciclo vital (siembra madurez), sólo el 50% de la radiación total es transportada por largos de ondas (superiores a 680 nm) con energías demasiado bajas para activar pigmentos activos en la fotosíntesis), que otro 14% de la radiación fotosintéticamente activa es la suma de la radiación reflejada (6%) y la transmitida (8%) y otro 20% la absorbida por pigmentos que no pueden traspasar la energía a la fotosíntesis, y se suma la no interceptada por hojas sobre todo en el período de emergencia a lograr una cobertura total, la disipada como calor, la gastada en respiración de mantención (aprox. 0.015 gr. CH₂O por gramo de biomasa de maíz por día, Loomis y Amthor, 1999) y la evaporación de agua, el máximo teórico que permite atrapar el sistema fotosintetizante, durante una estación de crecimiento, alcanza solo al 5% de la radiación total incidente en plantas C₃ o un 10% de la radiación fotosintéticamente activa (Loomis y Williams, 1963, Taiz y Seiger, 1998, Long et al. 2006). Esta cifra de 10% ha sido ratificada en el caso de trigo por Salisbury (1991) como se mencionara anteriormente. Por otra parte, se ha estimado que esta eficiencia teórica de la radiación total es de 5.1 en plantas C₃ y 6% en plantas C₄, pero en la práctica, las eficiencias máximas informadas, en condiciones de campo, son de 2,4% para plantas C₃ y 3, 4% para plantas C₄ en una estación de crecimiento. En períodos más cortos la eficiencia sube a 3,5% y 4,3% respectivamente (Long et al., 2006).

Valores medidos de la eficiencia de uso de la radiación solar (EUR:gr energía⁻¹) en tréboles van de 3.01, 2.59, 2.00, a 1.98 g MJ⁻¹ de biomasa, incluyendo raíces, para el caso *Trifolium vesiculosum* Savi, *T. incarnatum* L., *T. hirtum* All., y *T. subterraneum* L., (Kinery y Evers, 2008). Para el caso de un trigo de alto rendimiento se ha estimado una EUR de 1.5 gr MJ⁻¹, (Fisher, 1983) incluyendo raíces, de radiación absorbida con un RQ (número de cuantos necesarios para reducir una molécula de CO₂) de 24 y, de 2 gr MJ⁻¹ para un RQ de 14. En el caso de maíz de 2 gr MJ⁻¹ de radiación interceptada para un RQ de 18 y, 2.7 gr MJ⁻¹ para un RQ de 14 (Loomis y Amthor, 1999). Evidentemente la EUR medida o aparente no es una constante pues se ve afectada por numerosos factores incluyendo la densidad de flujo de fotones (DFF), CO₂, O₂ o temperatura. A medida que el flujo de fotones aumenta el requerimiento cuántico aumenta reduciendo la eficiencia debido a la saturación del sistema. Por otra parte, plantas C₃ y C₄ se afectan en forma diferente por factores ambientales tales como CO₂, O₂ o temperatura. Así, en planta C₃ el O₂, al estimular la foto respiración, reduce la fotosíntesis y aumenta el RQ o variará en las diferentes capas de hojas por el efecto del sombreo mutuo de las hojas que afectan la DFF. También es influida por la composición química de la biomasa (ésta se puede encontrar en las tablas de alimentos donde figuran los resultados de análisis proximales de ellos) o procesos fisiológicas tales como: la respiración de mantención o la reducción de radicales NO₃⁻ o SO₄⁻ que usan parte del poder reductor generado de la radiación solar absorbida. Estos aspectos que se deben tener en cuenta si se desea usar esta eficiencia para calcular la fotosíntesis de un cultivo. Estas variaciones del valor de la EUR debido a diversos factores introducen dudas sobre aquellos modelos cuyos cálculos sean basados en ella (Loomis y Amthor, 1999).

En todo caso, si usamos la EUR, la producción potencial teórica de grano de un cultivo C4, maíz, sería:

$$PR = EUR * Rad * CCG^{-1} * (1 - 2 RC) * IC * ((1 - H^{-1}/100))^{-1} * (1 + (M * 100^{-1})) \quad (26)$$

PR: potencial de rendimiento, producción en unidades de masa (kg) por unidad de área y por estación de crecimiento

Rad: radiación solar energía incidente (MJ) por unidad de área (Ha) y estación de crecimiento

IC: índice de cosecha

CCG: contenido calórico de la glucosa, MJ kg⁻¹.

RC: respiración de crecimiento.

H: contenido humedad del producto, en, %

M: contenido minerales, %

Esta ecuación supone que sólo hay limitaciones de radiación durante el periodo de crecimiento.

El largo de la estación de crecimiento se puede establecer conocidas las sumas de temperaturas, para llegar a madurez a partir de la germinación, la temperatura base y las temperaturas medias diarias. Las sumas de temperaturas diarias, en días-grados, se calculan y suman. Cuando la suma llega al valor en que se acumulan los días grados necesarios para la madurez nos dan el número de días necesarios para llegar a ella y así sabemos los días que debemos usar para obtener la integral de la radiación solar durante el período de formación de biomasa.

Si en la estación de crecimiento se recibe 38.105.403 MJ de radiación por ha, asumiendo una eficiencia de uso de la radiación de 6% y que el contenido calórico de la glucosa de 15.95 MJ kg⁻¹, la fotosíntesis bruta sería 143,343 toneladas de glucosa ha⁻¹ para el período. Usando los factores establecidos por de Vries et al. (1974), ver cuadro 9, para la conversión de glucosa en proteína, carbohidratos, proteínas, lípidos se puede calcular, la respiración de crecimiento para una biomasa de 7% de proteína, 85% de carbohidratos, 4% de lípidos y 4% de minerales. Esta sería 0.3235 g de glucosa por gramo de biomasa formada. Luego por cada tonelada de glucosa se puede sintetizar 0.353 (1 - 2*0.3235) gramos de biomasa seca en una temporada. A ella se debe agregar el contenido de minerales y la humedad

Así un cultivo de maíz con un índice de cosecha de 0.5, 10% de biomasa de raíces y 15% de humedad tendría un potencial de

$$Y = ((143.343 * 0.353) * 0.5 * 0.9 * 1.04 / (1 - 0.15)) = 28 \text{ ton ha}^{-1}.$$

Ya que Fairhurst y Witt, 2002 y Roy et al. 2006 estiman que no vale la pena hacer inversiones para obtener más del 80% del potencial, el potencial posible sería 22 ton ha⁻¹.

El récord mundial es 23 ton ha⁻¹ (ver tabla1) y en Chile el record, a nivel de agricultor, es de alrededor de 20 ton ha⁻¹ (Universidad Técnica Santa María, 2007). Según este cálculo el rendimiento potencial absoluto sería un 40% sobre los rendimientos máximos medidos

en Chile a nivel de un agricultor y el potencial factible económicamente, un 10% sobre ese rendimiento.

Cuadro 9. Factores de conversión de un gramo de glucosa a carbohidratos de reserva o estructurales, proteínas y lípidos.

Table 9. Conversion factors from one gram of glucose to reserve or structural carbohydrates, proteins and lipids.

	Gramos por gramo de glucosa
Carbohidratos de reserva o Estructurales	0.082
Proteínas a partir NO ₃ ⁻	0.404
Proteínas a partir NH ₄ ⁺	0.616
Lípidos.	0.33
Lignina	0.465

Fuente: Penning de Vries et al, 1974.

Como la radiación solar se extingue dentro del follaje debido a la absorción de ella por las hojas se puede calcular su intensidad, a distintos niveles, usando la ley de Beer-Lambert (Monsi y Saeki, 1, 1953, Saeki, 1960) y en base a ello calcular la contribución a la fotosíntesis del cultivo de cada nivel del follaje

$$I = I_0 e^{-IAF * k} \quad (27)$$

I: Intensidad de la radiación fotosintéticamente activa, RFA, al nivel deseado

I₀: Intensidad RFA incidente

K: Coeficiente de extinción de la RFA

IAF: Índice de área foliar m² hojas* m² suelo⁻¹.

La aplicación de esta ley, válida para soluciones diluidas, al caso del follaje de un cultivo es una aproximación posiblemente no muy exacta ya que la concentración de moléculas en una solución es un sistema bastante diferente a la concentración de hojas en el aire de un cultivo.

Otro método de cálculo de la biomasa producida es el que fuera propuesto por de Wit (1965).

$$\text{Biomasa (kg*ha}^{-1}) \text{ *día}^{-1} = Fc * y_n + (1-Fc) * y_d \quad (28)$$

Fc fracción del día que está con nubes = (Rse-0.5 Rs)/ 0.8 Rse.

Donde Rse es la radiación máxima posible incidente en un día despejado y Rs la medida, medidas en (cal*cm⁻²)*día⁻¹.

y_n = biomasa producida por un cultivo estándar en un día nublado

yd = biomasa producida por un cultivo estándar en un día despejado

De Wit provee tablas con los valores de yn e yd para distintos meses y latitudes nortes y sur de la producción de biomasa diaria.

El método de de Wit fue usado por Doorembos y Kassam (1979) haciendo ajustes por especie, temperatura, desarrollo en el tiempo, área foliar, producción neta de materia seca e índice de cosecha y agua para calcular rendimientos potenciales por el llamado “Método de zonas agro-ecológicas”.

Por su parte el rendimiento también Y puede ser estimado a partir de la relación establecida por Monteith (1977):

$$Y = Ec_1 * Ec_2 * IC * Rcc / CCB \quad (29)$$

$$Ec_1 = (1 - Alb - Tr). \text{ Aprox } 0.85 \quad (30)$$

Alb = albedo

Tr = transmisión

$$RFAab = (Rcc - Rcc * e^{-IAF * k}) * \% RFA = Rcc (1 - e^{-IAF * k}) * fRFA. \quad MJ \quad (31)$$

fRFA = Fracción Radiación fotosintéticamente activa en radiación solar, 0.5

CCB: Contenido calórico de la biomasa MJ kg⁻¹

Ec₁: Eficiencia con que la radiación es interceptada por el conjunto de hojas.

Ec₂: Eficiencia de transformación de la radiación absorbida en biomasa, 0.9

IC: Índice de cosecha.

Rcc: integral de la radiación solar total incidente durante el período de formación de la biomasa cosechada por unidad de área.

IAF. Índice de área foliar

Las expresiones mencionadas en este párrafo son las más conocidas y no ha habido comparaciones que permitan saber cual es aquella más conveniente. Probablemente su uso sea definido por los datos disponibles.

5.1.6.2. Ley de Ohm y Fick.

El flujo de CO₂ se puede derivar aplicando la ley de Ohm y de él deducir la fotosíntesis.

$$PR = \int_0^z \int_0^f \int_0^t [(\Delta CO_{2(z)} * R^{-1}) - RC - RM] * Kg * Kcq dz df dt * \%H^{-1} \quad (32)$$

Así el flujo es una diferencia de potencial, Δ CO₂ dividido por una resistencia.

Donde R es la suma de las resistencias al flujo de CO₂ de: el mesófilo, de los estomas y de la capa límite de la hoja.

Rc y RM respiraciones de crecimiento y mantención, gr CO₂

Kg: coeficiente para convertir CO₂ a glucosa.

Kcq: coeficiente para convertir glucosa a biomasa

f: área foliar

T: tiempo

Z: altura

Δ: Diferencia de concentración de CO₂ entre aire y cloroplasto. Esta última es 0 cuando hay fotosíntesis.

Esta expresión requiere conocer la función de variación de la concentración de CO₂ con la altura de las plantas y con el tiempo o tener una tabla que dé esta variación. Lo mismo se requiere para el área foliar. Si la integración se hace para el período posterior a la floración, el área foliar, es un dato que prácticamente no varía hasta madurez

El flujo de CO₂ se puede calcular también usando la ley de Fick:

$$J = D(dc/dx) \quad (33)$$

Ésta expresa que el flujo de una sustancia resulta directamente proporcional al gradiente de su concentración (en este caso del CO₂) o reemplazando D por una resistencia R igual a su inverso de, $R = D^{-1}$. De esta manera se tiene:

$$fCO_2 = (\text{Conc. CO}_2 \text{ aire} - \text{Conc. CO}_2 \text{ cavidad sub estomática}) * R^{-1} \quad (34)$$

La concentración del CO₂ en el aire es conocida (400 ppm), aunque está aumentando por efecto de las emisiones de CO₂, y la de la cavidad subestomática es cero o cercana a cero.

R: Resistencia al flujo del CO₂ entre el aire y la cavidad subestomática. Es la suma de resistencia de la capa límite de la hoja, la resistencia estomática, la resistencia al mesófilo de las hojas y la resistencia a la carboxilación.

Para un flujo máximo de CO₂ requiere de estomas abiertos, alta radiación y un viento superior a 7 km*hr⁻¹,

Sin embargo muchas veces a medio día, cuando la radiación es alta, la transpiración es también alta y la planta cierra sus estomas para evitar daños por sequía. Ello reduce la fotosíntesis.

La difusión de gases, en el aire, puede ser simple y lenta o turbulenta y rápida. A velocidades del viento menores de 7 km*hr⁻¹ el movimiento del aire es paralelo a la superficie de la hoja siendo el transporte de gases, CO₂ y vapor de agua por simple difusión debido al movimiento térmico de las moléculas. Al aumentar la velocidad del viento las hojas se mueven y se produce turbulencia, proceso que hace en los remolinos de viento y ellos transportan los gases mucho más rápido.

Lo normal es que en el campo se produzca un transporte turbulento.

El flujo de CO₂, el H₂O y el calor son dados por las expresiones siguientes:

$$F_{CO_2} = K_{CO_2} * (d_{CO_2}/dz) \quad (35)$$

$$F_{H_2O} = K_{H_2O} * (d_{H_2O}/dz) \quad (36)$$

$$FC = K_c * da * ce * (dt/dz) \quad (37)$$

K: son los coeficientes de difusión turbulenta para cada variable.

Este varía según la velocidad del viento. Para una velocidad de 2 m s⁻¹ sobre el follaje es generalmente de 500-2000 cm² s⁻¹. Para comparación los coeficientes de difusión en el aire a 20 °C son 0.16 y 0.25 cm² s⁻¹ para el CO₂ y el H₂O (Nobel, 1974).

da: densidad del aire 0.001225 gr cm⁻³

ce: calor específico del aire : 1 kJ kg⁻¹ °C⁻¹

Kc: W m⁻² °K⁻¹

Todos los K turbulentos son muy similares ya que son los torbellinos los que se mueven llevando con ellos los gases. Los remolinos son como un bote en un río, todo lo que va en él se mueve igual.

5.1.6.3. Conceptos de balances (de masa y energía) en cuantificaciones de las necesidades de agua, energía térmica, nutrientes y de un cultivo.

La aplicación de balances de masa ha sido muy usada en los cálculos de requerimientos hídricos, de requerimientos nutricionales de los cultivos y de cálculos sobre las necesidades de aportes energéticos en días de heladas. Los balances dan las necesidades netas y ellas deben ser corregidas por las necesarias eficiencias para obtener el valor real a usar.

Así, en el caso del riego la cantidad neta de agua a aplicar, en mm, se estima haciendo un balance de agua de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$H_n = LL - E_s - D_p + \nabla H - ETP \quad (38)$$

Donde,

H_n = agua neta, mm

LL = Lluvia, mm

E_s = Escurrimiento superficial, mm

D_p = Percolación profunda, mm

∇H = cambio en la humedad del suelo, mm

ETP = evapotranspiración, mm.

El valor de H_n v debe ser corregidos por sus eficiencias de aplicación para calcular las dosis o tasa a usar en la práctica. Sin embargo esta eficiencia normalmente disminuye al aumentar la dosis del insumo aplicado.

Por su parte los balances de energía se han usado para estimar la ETP o la cantidad de energía necesaria para protegerse de una helada.

En el día:

$$RN = Rs * al - L - \nabla T - F + \nabla s \quad (42)$$

Rn = radiación neta, energía por unidad de superficie, por unidad de tiempo.

Rs = radiación solar, MJ ha⁻¹ día⁻¹

al = coeficiente de reflexión, %

L = calor latente o energía usada en evaporación del agua, MJ ha⁻¹ día⁻¹

∇T = Energía usada en calentar la biomasa del cultivo, MJ ha⁻¹ día⁻¹

F = Energía usada en fotosíntesis, MJ ha⁻¹ día⁻¹

∇s = Energía usada en calentar el suelo, MJ ha⁻¹ día⁻¹

En promedio, usando esta ecuación el 80% de la energía va a evaporar agua lo que permite tener una idea de la cantidad de agua que se evapotranspira y del agua que se debe aportar en el riego.

El balance de energía en una noche sin viento y sin nubes es:

$$E_{neta} = E_{ess} - E_a - R_a - E_s \quad (43)$$

$$E_{ess} = e_s * \sigma * T_{ss}^4 \quad (44)$$

$$E_a = \lambda * (T_a - T_{ss}) \quad (45)$$

$$R_a = e_a * \sigma * T_a^4 \quad (46)$$

$$E_s = K_t * (T_{ss} - T_s) \quad (47)$$

$$e_a = f * (e_w / T_a)^{1/7} \quad (48)$$

$$f = 1,7 \text{ a } 1,9 \quad (49)$$

E_{ess} = Energía emitida por la superficie del suelo, W m⁻²

e_s = emisividad suelo, % en relación a un cuerpo negro, 0.95-0.99.

T_{ss} = temperatura superficie del suelo, T °K

E_a = energía térmica transmitida del aire al suelo, W m⁻²

λ = conductividad térmica del aire, 0,02 W·m⁻¹·K⁻¹

T_a = Temperatura del aire, T °K

R_a = Radiación emitida por el aire, W m⁻²

e_a = factor emisividad atmósfera (Brutsaert, 1982, Ortega et al. 2004).

σ = Constante de Stefan-Boltzman, 5,670 x 10⁻⁸ W m⁻² °K⁻⁴

e_w = presión del vapor de agua en la atmósfera a T_a, KPa.

Este cálculo permite estimar la energía real a aplicar para evitar que la temperatura baje de 0 °C, en una noche típica de helada sin viento, ni nubes, si consideramos que T_{ss} y T_a sean 273 °K, y conocemos la eficiencia del sistema que proveerá la energía. Ello porque al igualar las pérdidas de energía con la entrega de ella la temperatura no baja, en este caso de cero grados lo que es suficiente para que no se produzca daño en los tejidos vegetales cuyo punto eutectico (temperatura a la que se congela una solución salina) es -0.5 °C.

Como hemos visto en el caso de la radiación solar y del uso del agua el concepto de eficiencia ocupa un lugar destacado entre los parámetros de muchos cálculos de interés agronómico pero se requiere ser cuidadoso con él ya que es fácil confundir que se quiere expresar. Así cuando se habla de eficiencia del uso del agua ella puede estar refiriendo a la eficiencia del sistema de riego a nivel predial o a nivel de una zona o a la del uso del agua de la planta.

El uso del concepto de balance en el caso de la nutrición mineral lo vimos antes en la ecuación 2.

Una extensión de la idea de balance es el llamado balance funcional: esto es la idea de que en una planta u organismo vivo funciona un balance entre las funciones que hacen los distintos órganos (Brower 1983, Camargo y Rodriguez-Lopez, 2006). Así, si a una planta se le cortan sus hojas se reducirá el tamaño de sus raíces porque algunas morirán al no recibir los fotosintetatos necesarios para continuar vivas, hasta que se restablezca el equilibrio entre los aportes de carbohidratos suministrados por las hojas, la demanda de ellos por las raíces y la demanda de nutrientes y agua de la parte aérea. Viceversa si se podan las raíces, se reduce la parte aérea hasta que se restablece el equilibrio. Ello es, seguramente, consecuencia de los circuitos de retroalimentación que operan en todo organismo vivo.

Según Hunt (1990) existe una relación alométrica (una relación entre las dimensiones relativas de órganos diferentes con los cambios en el tamaño total del organismo) entre los órganos de una planta, determinada genéticamente, que cambia con el crecimiento de la planta. El "coeficiente alométrico" (K), determina cómo la relación MSr: MSa cambia con el tamaño de la planta

$$K = (\log MSr - \log b) / \log MSa \quad (50)$$

b = Cte.

MSr: masa de raíces de la planta

MSa: masa aérea de la planta

El coeficiente alométrico es la pendiente de la curva que se construye graficando el logaritmo del peso de las raíces versus el logaritmo del peso de los tallos.

5.1.6.4. Funciones de producción.

Se llama funciones de producción a ecuaciones que dan la cantidad de un bien producido en función de factores que afectan lo producido. En una empresa se usa recursos productivos (tierra, capital, maquinaria) y recursos humanos. La cantidad de estos que se use influye en la cantidad del bien producido. En el área agronómica se ha usado el análisis multivariado para obtenerlas. Así, si se mide el rendimiento y variables como: la radiación solar, las temperaturas, la humedad del suelo, las épocas de siembra, los contenidos de elementos nutritivos del suelo, los fertilizantes aplicados, la variedad, el

control de malezas, insectos y enfermedades, jornadas hombres usada y toda variable que pueda afectar el rendimiento, en un número adecuado de lugares (n+10) que aseguren los grados de libertad suficientes para el error (10 en este caso) es posible hacer regresiones múltiples en relación al rendimiento.

$$Y = F (ax+b*y, c*z.....+n*n, aa*x^2+bb* y^2, cc*z^2,... +nn*n^2) \quad (51)$$

Al hacer los cálculos es muy importante el orden en que ingresa las variables ya que, debido a las correlaciones entre las variables, estos valores cambian según el orden. Este problema se ha reducido usando métodos estadísticos adecuados. Por otra parte, es conveniente recordar que los coeficientes de las funciones son válidos para el set de datos del cual fueron extraídos y se puede cometer errores considerables si se extrapola el uso de la ecuación ajustada a otras condiciones.

6. MODELOS DE SIMULACIÓN

6.1. Introducción

Por modelo se entiende a una representación simplificada de una porción de la realidad. Generalmente esta porción es un sistema: o sea un conjunto de elementos vinculados entre sí que conforman una unidad. Como es bien sabido, los físicos, ingenieros, economistas, arquitectos y otros estudiosos construyen constantemente modelos que les sirven para comprender y estudiar los sistemas de su interés. Quizás fue ese ejemplo el que movió a diversos investigadores a desarrollar modelos de plantas usando técnicas desarrolladas por el análisis de sistemas.

Un modelo, en ciencia, es una representación abstracta, conceptual, gráfica o física, matemática de un sistema.

Los modelos que se puede construir de un sistemas pueden ser: físicos (maquetas, planos) o conceptuales (descripciones en prosa o en ecuaciones matemáticas). Entre los modelos expresados en lenguaje matemático se distingue modelos estadísticos (correlaciones simples o múltiples, estos establecen relaciones numéricas entre componentes del sistema o entre estos y factores de su entorno sin avanzar ninguna explicación del porqué de estas), modelos mecanicistas (aspiran a comprender, establecen relaciones que expliquen los mecanismos o procesos subyacentes y se basan en principios o leyes científicas conocidas. Estos últimos son los más científicos y aplicables a diversas situaciones) y los modelos ingenieriles o empíricos (que son modelos basados en ecuaciones empíricas simples aplicables sólo en el rango de condiciones donde fueron calibrados y están más interesados en el resultado práctico que en las explicaciones (Passioura, 1996).

Los primeros modelos de cultivos (Loomis y Willimams, 1963 o Duncan, Loomis y Williams, 1967) eran estáticos no consideraban la dinámica de las plantas. Posteriormente, de Wit, (1965) introdujo el enfoque dinámico explicado por Forrester, 1961,1968, para la simulación de poblaciones de plantas, Bouman, et al. 1996. Este enfoque ha sido usado ampliamente y es el dominante en el ámbito del modelaje del metabolismo de las plantas (Novoa y Loomis, 1981) y de la ecología y fisiología vegetal (Van Keulen, 1975, Penning de Vries, 1982, Goudriaan y Van Laar, 1994, Goudriaan, 1995, Thornley y Johnson 1990, Waggoner 1975, Richtie et al., 1985, Willer, 2004), simulación de arroz, Bouman et al. 2001, o para el manejo de cultivos (Marcos et al. 2004, LI et al., 2003) o el manejo de agua (Ines et al.2001) o estimar el efecto del cambio climático (Vucetic, 2011).

Podemos considerar que un modelo es una hipótesis cuali y cuantitativa de un sistema, es un resumen organizado de nuestros conocimientos sobre un sistema. El sistema puede ser: el metabolismo de algún elemento o compuesto, una célula, una planta o un conjunto de plantas, lo cual es de mayor internes agronómico.

Los modelos dinámicos, que son los que trataremos a continuación, parten por simplificar el sistema real a modelar. Esto lo hacen definiendo **variables de estado o niveles**

(variables que nos indican la evolución del estado de un sistema en el tiempo: número, superficie o biomasa de las hojas, biomasa o tamaño de los tallos, de las raíces o de los frutos), **tasas de los procesos que afectan a esas variables** (tasa de fotosíntesis y transporte de asimilados, tasas de respiración, de absorción de minerales etc..) que son consideradas como válvulas que regulan el flujo de energía o materia hacia o desde la variable de estado, **flujos de información** (circuitos de retroalimentación) que gobiernan las válvulas y **variables externas** al sistema que lo dirigen o empujan (radiación solar, temperaturas, disponibilidad de nutrientes, concentración de CO₂ del aire)

El poder cuantificar los procesos fisiológicos no es trivial ya que las herramientas matemáticas existentes no son fácilmente aplicables a problemas biológicos por haber sido desarrolladas por físicos o matemáticos para sistemas de su especialidad. Así, las funciones fisiológicas en una planta no están bien establecidas y por ello la solución de las ecuaciones diferenciales necesarias solo son posibles por vía numérica. Igualmente el integrar procesos que operan a velocidades muy distintas tales como los bioquímicos (rápidos) son los de crecimiento (lentos) no es fácil. Además, la comprensión de los procesos de desarrollo no es siempre completa lo que no facilita las cosas. No obstante lo anterior la construcción de modelos en fisiología y ecología vegetal se hizo posible gracias al advenimiento del análisis de sistemas, de las computadoras cada día más poderosas y de las técnicas de programación.

Por otra parte, no basta con construir un modelo. Para que sea útil debe confirmarse que opera correctamente y produce resultados confiables. El proceso de comprobación de funcionamiento del modelo se llama validación.

Veremos brevemente los pasos esenciales de la construcción de un modelo y cómo se valida. También haremos un comentario final sobre cuál es el resultado y las opiniones actuales sobre estos.

6.2. Cómo se construye un modelo

A continuación se describe como se construye un modelo dinámico de una planta. Se inicia con la conceptualización del sistema, se sigue con un diagrama relacional de un modelo de un grano donde se muestra la variable externas consideradas, las variables de estado, la tasa de los procesos que las determinan y los circuitos de retroalimentación considerados. Luego se presenta una ecuación diferencial de la biomasa de un grano para a continuación, por analogía, establecer las ecuaciones de la biomasa de las hojas, tallos y raíces. El conjunto de ecuaciones anteriores es el modelo de la planta. Este es un modelo posible pero simplificado solo para ilustrar los pasos y la lógica usada, no debe ser considerado un modelo completo ya que por ejemplo no se distingue las tasas de respiración de mantención de las de crecimiento y se agrupa todos los nutrientes en un solo grupo. Todo ello se puede hacer pero para fines didácticos se estima que lo dicho es suficiente.

Veamos en más detalle las etapas enunciadas:

6.2.1. Una conceptualización del sistema.

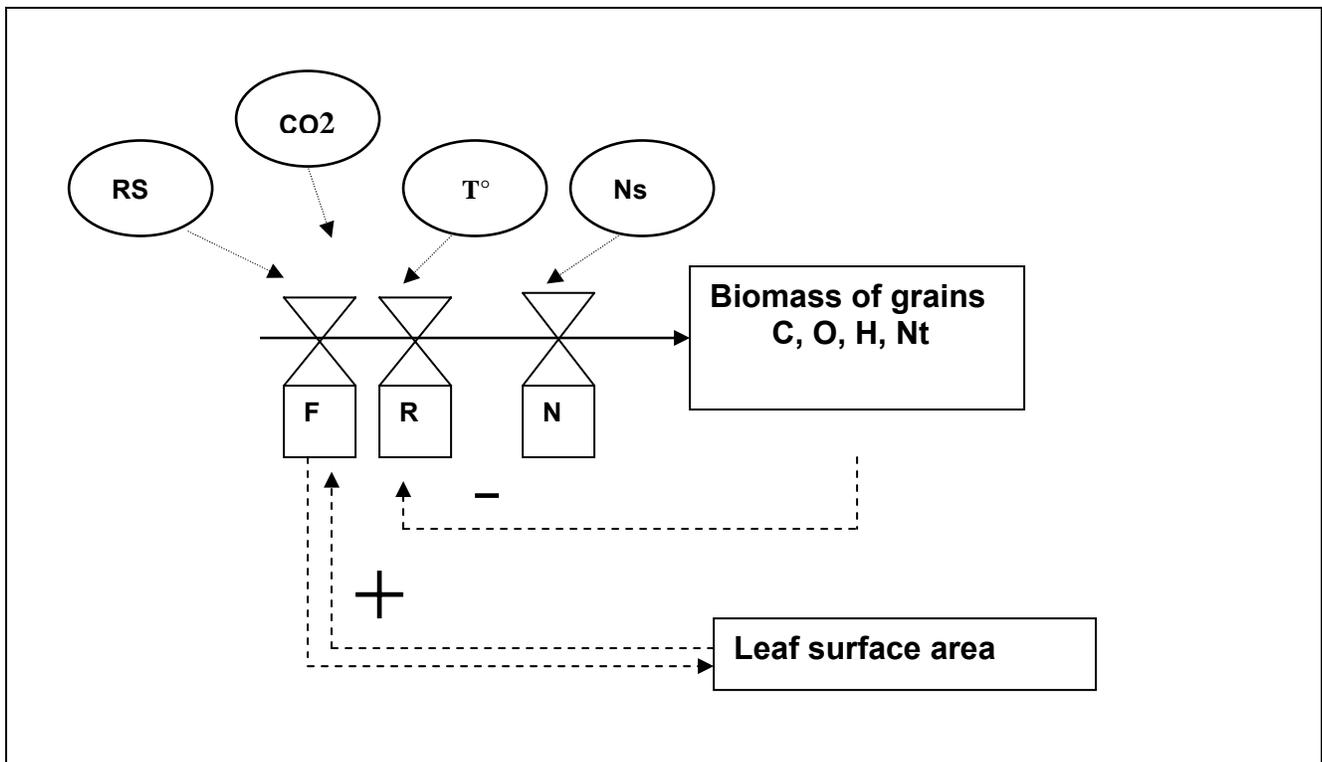
Esto es estudiar todo lo conocido sobre el sistema a modelar hasta comprender muy bien cuáles son las variables de estado a modelar, cuáles los procesos, cuáles los circuitos de retroalimentación, cuáles son los parámetros y las variables externas que lo afectan. Incluye una cuidadosa revisión de literatura. Los modelos de cultivos o praderas simulan el crecimiento de las plantas: los aumentos de biomasa de los diferentes órganos de una planta en el tiempo, lo que requiere conocer las tasas de los procesos anabólicos y catabólicos, la evolución de los coeficientes de repartición de los asimilados a cada órgano según la etapa de desarrollo de la planta o fenología y las variables externas que arrastran al sistema. En otras palabras simular su crecimiento y desarrollo. También son de interés agronómico aquellos que simulan, sistemas de riego, sistemas prediales, sistemas ganaderos, plagas, enfermedades y otros.

Es conveniente hacer un diagrama relacional del sistema al finalizar la conceptualización para visualizar mejor las relaciones entre variables de estado, procesos, circuitos de retroalimentación y variables ambientales del sistema. Luego se define los flujos, sus ecuaciones y confeccionar un algoritmo que haga los cálculos necesarios.

Un ejemplo, simplificado, de un diagrama relacional y de las ecuaciones de un modelo de la biomasa de un grano, después de la cuaja, es el siguiente:

Figura 3. Ejemplo de un diagrama relacional para un modelo de la biomasa de un grano.

Figure 3. Example of a relational diagram for a model of the biomass of a grain.



En este esquema, la tasa de fotosíntesis (F), de absorción de Nutrientes, N, la tasa de incorporación de hidrógeno H, y la tasa de respiración (R) de la planta determinan la variación de su biomasa y son representadas por el símbolo de una válvula. La radiación solar R_s , la concentración de CO_2 en el aire, los nutrientes del suelo (N_s) y la temperatura T° son variables externas. La línea continua representa flujo de masa, la discontinua flujo de información (una retroalimentación positiva en el caso de la fotosíntesis ya que aumenta el área foliar y negativa en caso de respiración ya que un aumento de biomasa aumenta la respiración) y la punteada la influencia de variables externas al sistema.

6.2.2. Definir las variables de estado, ecuaciones de los flujos que las modifican, parámetros y variables externas.

En un cultivo las variables de estado pueden ser el número, peso o superficie de hojas, tallos, raíces y órganos de reserva (granos, tubérculos u otros). Para calcular el valor de estas variables, en el tiempo, se debe establecer las ecuaciones que definen las tasas de los procesos involucrados, las ecuaciones diferenciales a integrar y que generan el estado de las variables, los parámetros de las ecuaciones, los datos de las variables externas que se usarán para los cálculos, así como confeccionar el programa computacional que manejará la base de datos, hará los cálculos y generará los informes u gráficos estimados necesarios.

Una ecuación posible que describe el peso de un grano en el tiempo sería la siguiente:

$$BG(t+1) = BG(t) + ((F-R) * (1 + (1/6) + (4/3))) * Crgr + Nt * CRNtgr \quad (52)$$

BG (t+1): es la biomasa del grano en el momento t+1.

BG (t): es la biomasa inicial del grano al momento t.

F: es el flujo de C fijado, derivado de la fotosíntesis, en gr por unidad de tiempo.

R: es el flujo de C emitido por la planta, derivado de la respiración, en gr por unidad de tiempo.

CRgr: es el coeficiente de reparto de carbohidratos al grano.

CRNgr. Coeficiente de reparto de nutrientes al grano

Suponiendo que sólo se exporta carbohidratos, originados por la fotosíntesis de las hojas, los valores $1/6$ y $4/3$, del tercer término representan las tasas de incorporación de hidrógeno y oxígeno, ya que por cada gramo de C se mueve $1/6$ de gramos de H y $4/3$ de gramos de oxígeno. Las tasas no dependen unas de otras, dependen sólo de las variables de estado o niveles. Sin embargo como en el caso del H y del O hay una relación estequiométrica conocida entre ellos y el C presente en un carbohidrato podemos deducir su principal flujo a partir desde el del C.

N: es el flujo de nutrientes incorporados, en grs.

Para estimar la tasa de fotosíntesis, respiración y otras se puede recurrir a alguna de las expresiones 32 o 34 que viéramos anteriormente-

Para el caso de los tallos, hojas y raíces las ecuaciones serían:

$$BT (t +1) = B (t) + ((F-R) *(1+ (1/6) + (4/3))) * Crst) + Nt * CRNtst (53)$$

$$BH (t +1) = B (t) + ((F-R) *(1+ (1/6) + (4/3))) * Crh + Nt * CRNtrl (54)$$

$$BR (t +1) = B (t) + ((F-R) *(1+ (1/6) + (4/3))) * Crr + Nt * CRNtro (55)$$

Los coeficientes de reparto (CR) varían entre 0 y 1 según la fenología de la planta. En el caso de los granos es 0 hasta la cuaja del fruto y después cercano a 1 hasta la madurez. El de las hojas es alto, cercano a 1, después de la emergencia y bajo, cercano a cero, después de la floración. CRN es la fracción de nutrientes absorbidos que se reparte a cada órgano.

Por efecto del desarrollo del cultivo, la repartición de los productos derivados del metabolismo, entre los distintos órganos, varía durante el ciclo vital de una planta. El coeficiente de reparto (% de los asimilados asignados en un momento dado a cada órgano) se hace dependiente de la fenología la que a su vez es dependiente de las temperaturas y del fotoperíodo, si la planta modelada responde a este factor: Las sumas de temperaturas se usan para establecer el momento de inicio y termino de cada periodo fenológico. Así, dependiendo de la suma de temperaturas y fotoperíodo se establece el momento de la germinación de la semilla, de la aparición de las hojas, de la floración y de la formación de los frutos y de la madurez. El coeficiente de reparto se hace variar de modo que es mayor al comienzo del período de crecimiento de un órgano y se hace cero al final. Al empezar a germinar la semilla las reservas se usan esencialmente en hacer crecer la raíz y más tarde los tallos y primeras hojas.

Además hay parámetros biofísicos y sanitarios que definen el comportamiento de un cultivo y que se debe incorporar a los modelos.

La fisiología de cultivos ha establecido varios parámetros que definen a un cultivo, entre estos tenemos: el tipo de sistema fotosintetizante (plantas C3,C4 o metabolismo crasuláceo); el albedo (coeficiente de reflexión de la luz o fracción de la luz incidente que es reflejada), las eficiencias de uso de la radiación por la fotosíntesis, la asociación con rhizobiums, el índice de cosecha (fracción de la biomasa aérea formada por el órgano de interés agronómico: grano, fruta, tubérculo, raíz, hoja o tallo (Hay 1995); el ángulo de inserción de las hojas; el coeficiente de extinción de la luz en el dosel; su composición química, su resistencia a bajas temperaturas, sus requerimientos térmicos (horas de frío o sumas de temperaturas), su requerimientos fotoperiódicos (día largo, corto o neutro), el contenido de clorofila y N de las hojas, las resistencias a enfermedades y plagas, las eficiencias del uso del agua, del N, P, K y de otros elementos nutricionales, la resistencia a estreses ambientales y a enfermedades. Estos parámetros no son siempre conocidos para una variedad dada lo que obliga a establecerlos previamente para incorporarlos a un modelo y así lograr una simulación correcta del cultivo.

Por otra parte se debe contar con datos meteorológicos (radiación solar, lluvia, agua, viento y temperaturas) y de los de suelos (pendiente, profundidad, disponibilidad de elementos nutritivos, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y otros que puedan afectar al cultivo) del sitio donde se usara el modelo.

Las ecuaciones diferenciales anteriores (52 a 54) se pueden integrar fácilmente en un computador usando técnicas numéricas y en su conjunto constituyen un modelo simplificado de un cultivo.

Una vez establecidas todas las ecuaciones, parámetros y datos necesarios se construye el programa que leerá los datos, hará los cálculos y presentará los resultados.

6.2.3. La construcción de un algoritmo

La integración de las ecuaciones diferenciales se hace por métodos numéricos siendo uno de los más usados el de Runge-Kutta de cuarto orden. Este es un método iterativo que parte de un valor inicial y luego paso a paso calcula la solución de la ecuación diferencial. Es usado por dar soluciones más precisas con poco tiempo de proceso. En los cálculos de las primeras tasas no se usa el método de Runge-Kutta, pues requiere saber por lo menos 4 tasas previas para estimar la quinta. Para las primeras tasa puede recurrir al método de Euler, procedimiento de primer orden para resolver una ecuación diferencial.

El Fortran es quizás el lenguaje que primero se uso por los modeladores de cultivos y el más usado. Durante algún tiempo se uso el lenguajes como lo es el CSMP (IBM, 1975) que facilita la construcción de modelos a personas no expertas en computación y para permitir que el modelador se concentre en el estudio del sistema y no en la complejidad de la programación. Fue un lenguaje muy favorecido por los modeladores holandeses pero que ya no se usa. Posteriormente se desarrollo un sistema llamado FSE (Fortran Simulation Environment) diseñado para hacer modelos de cultivos (Van Kraalingen, 1995, Bouman et al. 2001).

El algoritmo construido debe solucionar algunos problemas tales como:

De qué manera el algoritmo resuelve el problema del cálculo de las tasas de los procesos, que se dan en una planta, cuando son afectadas por los diferentes factores que están actuando simultáneamente: ¿se aplica la ley del mínimo o hay interacciones? Algunos investigadores (Fick et al., 1975, Loomis y Connors, 2002) consideran que aplicar la tasa más limitante es la respuesta a intervalos cortos y que las interacciones aparecen en periodos de tiempo más largos. La ley del óptimo explica muchas de las interacciones positivas observadas, las que serían consecuencia de que el factor más limitante cambia en el tiempo.

Otra dificultad es el conectar el nivel bioquímico con el celular, el de planta. La dificultad radica en que los eventos bioquímicos suceden a velocidades muy altas lo que requiere de intervalos de integración Δt pequeños y por lo tanto gran cantidad de iteraciones para evitar que las aproximaciones de las integraciones numéricas produzcan resultados inestables o negativos ilógicos, tales como niveles negativos de agua o de N, mientras que los procesos de desarrollo a nivel de la planta son muy lentos. Ello significa tener un sistema en el que hay que integrar procesos que tienen muy distintas propiedades temporales o "stiff system". Para resolver este problema se han propuesto diferentes soluciones (Liniger and Willoughby, 1970, Novikov and Novikov, 2010).

El proceso de modelación se puede facilitar usando la llamada aproximación jerárquica (Goodall, 1976). Esta consiste en subdividir el sistema en sub sistemas y a veces estos en sub-sub sistemas. Por ejemplo la fotosíntesis a nivel de cloroplasto (Farquhar et al. 1980) puede ser un subsistema de la fotosíntesis a nivel celular donde el CO₂ debe moverse desde la membrana celular, cruzarla, al cloroplasto vía el protoplasma lo que requiere modelar las resistencia a este flujo, este a su vez un subsistema a nivel de la hoja el que debe considerar una resistencia variable que produce el estoma y la resistencia de la capa límite de la hoja y esta otra subrutina de un modelo a nivel del follaje que debe incluir factores tales como el ángulo de inserción de las hojas, la superficie foliar, la capa límite del follaje. Desde el punto de vista del algoritmo cada sub sistema puede ser una subrutina. Ello tiene la ventaja de que cada subrutina se puede verificar. Además su resultado ser usado como dato para la subrutina de nivel siguiente. Así se integra niveles y nacen las interacciones entre subsistemas son generalmente intercambios de masa, energía o información. Por otra parte el proceso de modelación involucra, muchas veces a diversos especialistas cada uno de los cuales puede aportar sus conocimiento específicos desarrollando la subrutina para la cual este más preparado.

6.2.4. Validación del modelo

Es una comprobación de los resultados que entrega el modelo. Se hace vía un análisis de comportamiento, análisis de sensibilidad y comparaciones de los resultados generados por el modelo con resultados producidos por el sistema real.

El análisis de comportamiento significa comparar los resultados del modelo con observaciones hechas a nivel general del comportamiento del sistema. Así, si el modelo predijera que la absorción de N aumenta con la luz ello debe estar de acuerdo con observaciones experimentales, si no es así se debe cambiar el modelo.

El análisis de sensibilidad se refiere a comparar los cambios en los resultados del modelo con cambios en la estructura o parámetros del modelo. Si el modelo no es sensible a un parámetro o estructura ello puede significar que no vale la pena dedicar esfuerzo a mejorar el valor del parámetro o mejorar la estructura en cuestión.

El grado de ajuste entre el modelo y los datos experimentales se puede estimar por métodos biométricos tales como correlaciones.

Para mejorar el ajuste entre el modelo y los datos se hace, una calibración. Ella es una manera de estimar los parámetros del modelo. Para detalles, desde una perspectiva estadística, ver a Wallach, 2011.

6.3. Estado actual del arte y evaluación de los modelos construidos

La construcción de modelos ha tenido desde sus inicios a seguidores y detractores. Los primeros ensalzan o destacan las ventajas de estos y los segundos sus incertidumbres y debilidades. Entre las ventajas de los modelos se destaca que son integradores u holistas,

que incluyen la cuantificación de variables de estados y procesos o que son un resumen de los conocimientos sobre un sistema, que permiten detectar áreas donde los conocimientos son pobres y requieren más investigación, que por estar basados en leyes físicas, químicas y biológicas son menos dependientes de las condiciones locales. Los detractores manifiestan que nada muy útil ha salido de ese esfuerzo, que sólo los enfoque reduccionistas experimentales han generado verdadero conocimiento (Monod, 1970), que los modelos no son una actividad científica y que son imposibles de comprobar científicamente.

Las opiniones son muy variadas y sostenidas por investigadores muy destacados. Hace más de 40 años Passioura (1973), escribía sobre el sentido o falta de él en la simulación y en buena medida reafirma su posición en 1996 (Passioura, 1996). Según este investigador los modelos se pueden dividir en dos tipos los orientados a mejorar nuestra comprensión de la fisiología y de su interacción con el medio ambiente (ciencia) y los que pretenden dar orientaciones sensatas sobre el manejo de cultivos y hacedores de políticas (ingeniería). Él concluye que es difícil encontrar un rol útil, a los modelos, que no sea el de auto educación para el modelador. Igualmente Monteith, 1996, exige un mayor balance entre medir y modelar y nos recuerda el motto "Nullis Verba" que, en 1660, Robert Boyle y Christopher Wren establecieron para la Royal Society of London y que, según él, se podría traducir como **investigar, no especular**. Cree que el modelar y el hacer ciencia son siempre son compatibles, aunque reconoce que la actividad no es un ejercicio sin frutos y que hay modelos basados en principios bien establecidos y robustos. Duda también de la posibilidad de probar un modelo ya que este contiene, normalmente, un conjunto de hipótesis y no es posible probar un conjunto de hipótesis. El método científico sólo permite probar una hipótesis a la vez. Cree sin embargo que la construcción de modelos mecanicistas basada en principios y leyes bien establecidas es una actividad antigua y respetable.

Uno de los resultados que hacen dudar de los modelos es el que se obtuvo al comparar 14 modelos mecanicistas de trigo de diversas complejidades (mayor detalle científico en procesos incorporado al modelo) y corridos para el mismo conjunto de datos. Los modelos dieron resultados muy diferentes, desde 2,5 a 8 ton/ha y desde 5,4 a 10,3 para dos localidades. No se observó ninguna tendencia en las predicciones o mejoras en la precisión asociada a una mayor complejidad del modelo (Goudriaan, 1995, citado por Sinclair y Seligman, 1996). Por otra parte ellos requieren: gran cantidad de datos y parámetros, de personal capacitado que no siempre es fácil obtener. Las incertidumbre en los valores de los parámetros se traduce en grandes incertidumbres al hacer proyecciones sobre los efectos en los rendimientos del arroz y del maíz como consecuencia del cambio climático usando basados en modelos de procesos (Iizumi et al., 2009). Ello dificulta su uso en países con pocos recursos. Un problema que se encuentra al tratar de que el modelo integre más y más información es el que en la medida que el modelo se hace más complejo empieza a ser difícil entender el porqué de los resultados que genera.

Así como hay algunos autores tienen dudas sobre los modelos hay otros autores tienen actitudes intermedias sobre ellos (Sinclair y Seligman, 1996), mientras que muchos otros los han apoyado (de Wit, 1965, Loomis, 1971, Thornley y Johnson, 1990, Boote et al. 1996, Loomis y Amthor, 1999, Baker et al. 1989, Baker et al. 2004, Marcos et al. 2004, Willers, 2004, Lizaso et al, 2007, Yin and Van Laar. 2005).

En opinión de algunos investigadores la principal conclusión que se puede obtener de los resultados de la investigación en modelos es que ellos son una herramienta heurística (que estimula) en las actividades de enseñanza, investigación, el manejo y aplicaciones administrativas y que tendrá una productiva contribución en estas áreas en el futuro (Sinclair y Seligman, 1996).

El desarrollo de modelos de cultivos no ha sido muy grande en los últimos tiempos y la mayor parte del trabajo se ha hecho en aplicaciones (Yin and Van Laar. 2005).

Si se desea ilustrarse en el modelamiento del crecimiento, desarrollo y rendimientos de cultivo un libro interesante de leer es el *Modelling Physiology of Crop Development, Growth and Yield* de Afshin Soltani y Thomas Sinclair, 2012.

Según Boote et al. (1996), los modelos han sido usados como:

Herramienta de investigación:

Hacer resúmenes que sintetizan la comprensión sobre las plantas y los cultivos. En el caso de modelos simples ellos son hipótesis sobre el comportamiento del sistema, pueden iluminar áreas donde el conocimiento es escaso o inadecuado tanto al momento de construir el modelo como al tratar de validarlo.

Integrar conocimientos de diversas disciplinas: matemáticos, físicos, químicos, fisiológicos, edafológicos, agronómicos, económicos, micro meteorológicos, ecológicos, informáticos, etc....

Organizar experimentos. Organizar y compilar datos de uno o muchos experimentos. Caso del International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. Este es un grupo formado por el Departamento de Agronomía y Suelos de la Universidad de Hawaii, Honolulu y numerosos colaboradores.

Ayudar al mejoramiento genético: usando análisis de sensibilidad en un modelo para saber si vale la pena o no mejorar un cierto carácter. Probar a priori el resultado en producción, de mejorar una característica que se sabe tiene efecto en la producción tal como variar la tasa de fotosíntesis de las hojas ya que se sabe que para aumentar esta capacidad se debe tener hojas más gruesas y ello implica mayor uso de productos de la fotosíntesis en formar hojas o explorar el efecto de alargar el período de llenado de granos en relación al clima (a mayor largo período mayor peligro de sequía o de daños por frío).

Estudiar las causas para el diferencial de producción entre agricultores e investigación. Ello es posible estudiando los resultados que entrega el modelo, cuando se corre para las condiciones de suelo y clima de un agricultora, a cambios en la época de siembra, fertilización o riego, Si los resultados de estos cambios entregan simulaciones que dan aumentos en los rendimientos es una indicación de la causa de las diferencias observadas y de que debe cambiar el agricultor para mejorar sus resultados.

Herramienta para el manejo de cultivos:

Asesorar el manejo cultural: comparar fechas de siembra, espaciamiento, variedad según grupo de madurez, manejo del agua y de la fertilización, agricultura de precisión. Incluso se ha opinado que un mayor uso de información puede reducir el uso de energía en agricultura (Chancellor, 1981).

Herramienta para análisis de políticas:

Asesorar en tomar la mejor decisión para reducir la lixiviación de fertilizantes, de pesticidas o erosión.

Pronósticos de cosecha.

Evaluar los efectos de los cambios climáticos

Las fallas de algunos los modelos actuales son entendibles si consideramos el escaso conocimiento que tenemos de las interacciones entre componentes de los diversos niveles de organización de una población de plantas y de la enorme influencia de la variabilidad espacial y temporal. En la mayoría de los modelos desarrollados hasta el momento no se hace uso de la información que entregan las hormonas, no se modela estos circuitos de retroalimentación lo que es evidentemente una falla grande ya que ello significa ignorar un elemento estructural básico. Tampoco se modela otras retroalimentaciones como el efecto de los niveles de fructosa 2,5 difosfato en la fotosíntesis o el de los niveles de asparagina en la absorción de N.

Por otra parte las validaciones de los modelos no pueden hacerse sin considerar la variación espacial, ya que suponer valida una condición de suelo promedio es probablemente erróneo. Si consideramos las diferencias de producción debidas a la variabilidad espacial de los suelo, a nivel de un potrero, tales como fertilidad, características hídricas, exposición y otras, 3 a 7 ton/ha por ejemplo, ellas nos dan una idea de la enorme influencia de este factor y del gran error que podríamos cometer si corremos el modelo para una sitio de 3 ton y lo generalizamos a una gran superficie de suelo. Pero además de la variación del suelo existe variabilidad de condiciones topográficas, clima, infraestructura socio- económicas o de políticas para la agricultura según vayamos subiendo de la escala predial a la de una zona, de país o continente a la cual estemos aplicando el modelo. La combinación de modelos dinámicos con SIGS hace posible incluir la variabilidad espacial (Sinh et al 1993, Jongschaap, 2006).

Coincidiendo con la opiniones de Sinclair y Seligman (1996) y con las de Boote et al. (1996) necesitamos teorías matemáticas del crecimiento de los cultivos y ello sólo será posible si logramos construir modelos confiables.

Todos los problemas de conocimientos de los procesos fisiológicos, ecológicos, de logística (estructuras inadecuadas) y operacionales (datos o potencia de las computadoras) que tiene la actividad de modelaje actual serán probablemente superados en el futuro y podremos construir modelos confiables y útiles. Si ello no fuera así no sólo

habrán fracasado los modeladores sino toda la investigación ecofisiológica, pues los modelos reflejan el estado del arte de ellas en un momento dado.

7. CONCLUSIONES

En base a lo dicho y analizado en los párrafos anteriores es posible establecer las siguientes conclusiones

1.- Los tres principios discutidos parecen ser todo lo necesario para establecer una teoría agronómica.

2.- La búsqueda de propiedades emergentes en los sistemas agronómicos parece una buena estrategia a tener en cuenta en la investigación agronómica futura.

3.- El establecer cuáles son los niveles mínimos necesarios de los diversos factores de producción para obtener mejores eficiencias en el uso de los recursos es otra estrategia que debería rendir frutos en el futuro.

4.- La búsqueda de mecanismos claves (fisiológicos, de gestión u otros) sería otra área para una agronomía más eficiente y productiva.

5.- Parece urgente el buscar mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes.

6- El uso del análisis de imágenes pone a la mano de los investigadores una poderosa herramienta que permite medir simultáneamente muchas variables biofísicas y agronómicas que afectan a un cultivo, de manera no destructiva y en el espacio. Permitiendo el desarrollo futuro de una herramienta de retroalimentación para mejorar el manejo del sistema por parte del productor o agrónomo y la agricultura sitio específica.

7- Parece necesario actualizar los criterios de clasificación por capacidad de uso de los suelos. Ello por uso de técnicas de siembra como la cero labranza y de riego por goteo que permiten el cultivo de suelos clasificados como no cultivables.

8.- El uso de modelos de simulación acoplados a sistemas de información geográfica debería mejorar las predicciones de esos modelos.

Agradecimientos: Se agradece sinceramente los consejos y revisiones del manuscrito hechas por los profesores Edmundo Acevedo y Rolf Kummerlin.

LITERATURA CITADA

ABU-HAMDEH, NIDAL H. 2000. Effect of tillage treatments on soil thermal conductivity for some Jordanian clay loam and loam soils. *Soil & Tillage Research* 56 (2000) 145-151

ACEVEDO, E. and P.SILVA. 2003. Agronomía de la cero labranza. Universidad de Chile . Serie Ciencias Agronómicas N° 10. 132 p. Santiago, Chile.

AGRIOS GEORGE N. 1997. *Plant Pathology*, Academic Press 618 p

AKIYAMA, T. and Y, INOUE, 1996. Monitoring and predicting crop growth and analysing agricultural ecosystems by remote sensing, *Agric, and Food Sci*, in Finland, 5:367-376.

ALTOMARE, CLAUDIO y TRINGOVSKA, IVANKA. 2011. Beneficial soil microorganisms an ecological alternative to soil management. In: Eric Licctfouse, ed. *Genetics,Biofules and farming systems* p. 131-214. *Sustainable Agriculture Reviews* 7. Springer. Dordrecht, Heilderberg, London, New York.

ALLISON, L.E., BERSTEIN, L., BOWER,C.A, BROWN C.A, FIREMAN, M., HATCHER, J.T. HAYWRD, H.E, PEARSON, G.A., REEVE, R.C. RICHARDS AND L.A. , L.V. WILCOX.1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA. *Agriculture Handbook* N° 60. 160 p. Washington. USA.

AMTHOR, J.S. 1989. *Respiration and crop productivity*. Springer-Verlag, New York. 215 p.

AMTHOR J.S. 2007 Improving photosynthesis and yield potential. In: P. Ranalli (ed.), *Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses*, 27–58. Springer. Netherlands.

SOLTANI AFSHIN y THOMAS SINCLAIR, 2012. *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*. CABI. 322p.

AUSTIN, R.B., BINGHAM, J., BLACKWELL, R.D., EVANS, L.T., FORD, M.A., MORGAN, C.L. and M. TAYLOR. 1980. Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 94:675-689.

BAKER, D.N., BOONE M., BRIONES L., HODGES H.F., JALLAS E., LANDIVAR J.A., MARANI A., MCKINION J.M, REDDY K.R., REDDY V.R., TURNER S., WHISLER F.D. and J. WILLERS. 2004. GOSSYM: The story behind the model. <http://pestdata.ncsu.edu/cottonpickin/models/GOSSYM.pdf>. 52p.

BABCOCK, BRUCE A. and W. E. FOSTER. 1991. Measuring the Potential Contribution of Plant Breeding to Crop Yields: Flue-Cured Tobacco, 1954-87. *American Journal of Agricultural Economics*. 73(3):850-859

BAKER, D.N., LAMBERT J.R. AND J.M. MCKINION. 1989. GOSSYM: A Simulator of Cotton Crop Growth and Yield. *S.C. Agr. Exp. Sta. Tech. Bul.* 1089. 134pp.

BAKER, D.N., J.A. LANDIVAR, F. D. WHISLER, AND V.R. REDDY. 1979. Plant responses to environmental conditions and modeling plant development. In. Proc. Weather and Agriculture Symp. Kansas City, MO., Oct. 1-2, 1979.

BALASUBRAMANIAN, B. ALVES, M., AULAKH M., BEKUNDA Z., CAI L., DRINKWATER D., MUGENDI C., VAN KESSEL, AND O. OENEMA. 2004. Crop, environment, and management factors affecting nitrogen use efficiency. p. 19-33 In: A.R. Moiser, R., K. Syers, J. R. Freney (eds.) Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the Impact of Fertilizer Use on Food Production and the Environment. Washington, D.C. Island Press.

BARTON, LOUKAS <http://www.pnas.org/content/106/14/5523.full-aff-1#aff-1>, **NEWSOME S. D., FA-HU CHEN, HUI WANG, GUILDERSON T. P. and R. L. BETTINGER. 2009.** Agricultural origins and the isotopic identity of domestication in northern China. Proc. Nat. Acad. Sci. 106 (14): 5523-5528

BASTIAASSEN, G.M., MOLDEN D.J. and I.W. MAKIN. 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications, Agric. Water Manag., 46:133-155.

BAULE, B. 1917. Mitscherlich law of physiological relations (en alemán). Landwirthshafliche Jahrbuecher 51 (1916-1917):363-385

BELL, M.A., FISCHER R.A., BYERLEE D., and K. SAYRE. 1995. Genetic and agronomic contributions to yield gains: A case study for wheat. Field Crops Res. 44:55–65.

BENCKISER, GERO, 2010. Ants and sustainable agriculture. A review. Agron. Sustain. Dev. 30 (2010) 191–199

BERNACCHI, C.J., SINGSAAS, E.L., PIMENTEL, C., PORTIS, A.R., and P. LONG. 2001. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limiter photosynthesis. Plant Cell and Environ. 24:253-259.

BERRY, P.M., STERLING, M., SPINK, J.H., C.J. BAKER, SYLVESTER-BRADLEY, R., MOONEY, S.J., TAMS, A.R. and A.R. ENNOS. 2004. Understanding and reducing lodging in cereals. Adv. Agron. 84: 218-263

BLACK, CHARLES A. 1993. Soil fertility evaluation and control. CRC Press.

BLACKMAN, F.F. 1905. Optima and limiting factors. Annals of Botany 19:281-295.

BLACKMER, T.M., SHEPERS, J.S. and G.E. VARVEL. 1994. Light reflectance compared with other Nitrogen stress measurements in corn leaves. Agron. Jour. 86:934-938

BORRÁS, L., SLAFER, G.A. and M.E. OTEGUI 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. Field Crops Res. 86, 131–146.

BOUMAN. B., M.J KROPFF, T.P. TUONG, MCS. WOPEREIS. HFM BERGE, ten AND H.H VAN LAAR. 2001. ORYZA2000: modeling lowland rice: Los Baños (Philippines). International Rice Research Institute and Wageningen: Wageningen University and Research Center. 235 p.

BRONSON, K.F. , MALAPATI, A., SCHARF, P.C. and R.L. NICHOLS. 2010. Canopy Reflectance-Based Nitrogen Management Strategies for Subsurface Drip Irrigated Cotton in the Texas High Plains. *Agr. Jour.* 103 (2): 422-430

BOOTE, K.J., JONES, J.W. and PICKERING, N.B. 1996. Potential uses and limitations of crops models. *Agron. Jour.* 88 : 704-716.

BROWER R: 1983. Functional equilibrium: sense or nonsense? *Netherl. J. Agric Sci.* 31:335-348.

BRUTSAERT, W. 1982. Evaporation in the atmosphere: Theory, history, and applications. 229 p. D. Reidel, Higham, Massachusetts, USA.

BOUMAN BAM, VAN KEULEN H, VAN LAAR HH, RABBINGE R. 1996. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agric Syst.* 1996;**52**(2-3):171–198.

CALABOTTA, BETH. 2009. 300 bushels/acre U.S. corn yield is achievable by 2030. EPA – RFS2 Workshop. June 2009.
http://client-ross.com/lifecycle-workshop/docs/2.2_Calabotta_Monsanto_6-9-09pm.pdf

CAMARGO IVÁN DARÍO y NELSON RODRÍGUEZ-LÓPEZ. 2006. Nuevas perspectivas para el estudio de la asignación de biomasa y su relación con el funcionamiento de plantas en ecosistemas neotropicales.
<http://www.virtual.unal.edu.co/revistas/actabiol/PDF's/v11s1/v11s1a06.pdf>

CAMPILLO, R., JOBET, C. y P. UNDURRAGA D. 2007. Optimización de la fertilización nitrogenada para trigo de alto potencial de rendimiento en andisoles de la Región de La Araucanía, Chile. *Agricultura Técnica* **67(3):281-291.**

CAMPILLO, R., JOBET, C. y P. UNDURRAGA D. 2010. Effects of nitrogen on productivity, grain quality, and optimal nitrogen rates in winter wheat cv. Kumpa-Inia in andisols of southern Chile. *Chilean J. Agric. Res.* 70(1):122-131

CAO, D., PIMENTEL, D. and KELSEY HART. 2002. Postharvest crop losses (Insects and Mites). In *Encyclopedia of Pest management.* Taylor and Francis Group, pp 645-647.

CARBERRY, P. S., S. E. BRUCE, J. J. WALCOTT and B. A. KEATING. 2010. Innovation and productivity in dryland agriculture: a return-risk analysis for Australia. *The Journal of Agricultural Science* Published online: 22 Dec 2010. DOI: 10.1017/S0021859610000973

CASSMAN, K.G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 96:5952–5959,

CELA S., SALMERÓN, M., ISLA R., CAVERO, J., SANTIVERI, F. and J. LLOVERAS . 2010. Reduced nitrogen fertilization to corn following alfalfa in an irrigated semiarid environment. *Agr. J.* 103 (2): 520-528

CHANCELLOR, W. J. 1981. Substituting information for energy in agriculture. *Transaction ASAE* 802 - 807

CHARTIER, P. 1966. Etude theorique de la photosynthese globale de la feuille. *C R. Acad. Sci. Paris* 263: 44-47.

CHARTIER, P. 1970. A model of CO₂ assimilation in the leaf. In: Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Setlik, I., ed. Pudoc, Wageningen pp. 307-315.

CHEMINOVA, 2009.

http://www.cheminova.com/en/insects_weeds_and_fungi.htm

CHEN, XIN-PING, CUI, ZHEN-LING, VITOUSEK, P.M., CASSMAN, K.G., P. A MATSON, BAI, JIN-SHUN, MENG, QING-FENG, HOUA, PENG, YUE SHAN-CHAO, RÖMHELDE V., and ZHANG FU-SUO, 2011. Integrated soil–crop system management for food security. *PNAS* 108 (16): 6399–6404

CLARKE, T,R, 1997. An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors, *Hortecol.* 7(1):9-16

CONN, E. E. and P.K. STUMPF. 1972. *Outlines of biochemistry.* John Wiley and Son, Inc. New York. 535 p

COLINVAUX, P. 1982. *Invitation a la science de l' écologie.* Editions du Seuil. 249 p.

COOK, ROBERTA. 2006. Overview of the greenhouse industry (GH) vegetable industry. Focus on tomatoes.
<http://postharvest.ucdavis.edu/datastorefiles/234-665.ppt#727,11,Diapositiva 13>

CRAUFURD, P. Q. and T. R. WHEELER. 2009. Climate change and the flowering time of annual crops. *J. Exp. Bot.* (2009) 60 (9): 2529-2539.

DADHWAL, V.K. 2003. Crop growth and productivity monitoring and simulation using remote sensing and gis. *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology* pp. 263-289

DAHL G. E., B. A. BUCHANAN AND H. A. TUCKER. 2000. Photoperiodic Effects on Dairy Cattle: A Review. *Journal of Dairy Science* Vol. 83, No. 4, 2000.

DE ANGELI, A., D. MONACHELLO, G., EPHRITIKHINE, J. M., FRACHISSE, S. THOMINE, GAMBALE, F. and H. BARBIER-BRYGOO. 2006. The nitrate/proton antiporter AtCLCa mediates nitrate accumulation in plant vacuoles. *Nature* 442, 939-942 (24 August 2006) | doi:10.1038/nature05013

DELATORRE H., J. 2001. Los suelos salino/sódicos y los cultivos. In: Agenda del Salitre. pp 81-97 . SQM, Santiago, Chile.

DOBERMANN A. 2007. Nutrient use efficiency? Measurement and management. In: IFA international workshop on fertilizers best management practice, 7-9, March 2007 Brussels. Belgium.

DE WIT, C.T. 1958. Transpiration and crop yield. Wageningen. The Netherlands. Versi-Landbouwk. Onderz 648.88 pp. (Inst. of Biological and Chemical Research on Field Crops and Herbage)

DE WIT, C.T. 1965. Photosynthesis in leaf canopies. Agr. Res. Rep. 663. Pudoc, Wageningen, The Netherlands. 57 p.

DE WIT, C.T. 1970a. Dynamic concepts in biology. In Prediction and measurement of photo synthetic productivity. Pro, IBP/PP Technical Meeting, Trebon, Czech. Pudoc. Wageningen, The Netherlands, pp 17-23.

DE WIT, C.T. 1970b. The simulation of photosynthetic systems. In Prediction and measurement of photo synthetic productivity. Pro, IBP/PP Technical Meeting, Trebon, Czech. Pudoc. Wageningen, The Netherlands, pp 47-70.

DE WIT, C.T. 1992. Resource use efficiency in agriculture. Agricultural Systems 40 ; 125-151.

DE WIT, C.T. 1994. Resource use analysis in agriculture: a struggle for interdisciplinarity. pp 41-55. In: Louise O. Fresco, Leo Stroosnijder, Joan Bouma and Herman van Keulen (editors). The future of the Land: Mobilising and Integrating Knowledge for Land Use Options. John Wiley & Sons, Chichester, England.

DIAZ, O., ANDERSON, D Y HANLON, E. 1992. Soil nutrient variability and soil sampling in de the Everglades agricultural area. In: Communications in soil science and plant analysis. International symposium on soil testing and plant analysis in the global community. P 2313-2337.

DOBERMANN, A., C. WITT, D. DAWE, S. ABDULRACHMAN, H.C. GINES, R. NAGARAJAN, S. SATAWATHANANONT, T.T.SON, G.H. WANG, N.V. CHIEN, V.T.K. THOA, C.V. PHUNG, P. STALIN, P. MUTHUKRISHNAN, V. RAVI, M. BABU, S. CHATUPORN, J. SOOKTHONGSA, Q. SUN, R. FU, G.C. SIMBAHAN AND M.A.A. ADVIENTO. 2002. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping in Asia. Field Crops Research 74: 37-66.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33. FAO, Rome: 193p.

DUNCAN, W.G., LOOMIS, R.S., WILLIAMS, W. A. and HANAU, R. 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities. Hilgardia 38 :181-205.

DUVICK, D.N. 2005. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Advances in Agronomy*, 2005 (Vol. 86) (No. 1) 83-145.

DUVICK, D. N. and K. G. CASSMAN. 1999. Post–Green Revolution Trends in Yield Potential of Temperate Maize in the North-Central United States. *Crop Sci.* 39:1622–1630

EDMEADES, G., FISCHER A. and D. BYERLEE. 2010. Can we feed the world in 2050? pp 1-9 . "*Food Security from Sustainable Agriculture*" Proceedings of the 15th ASA Conference, 15-19 November 2010, Lincoln, New Zealand. Web site www.agronomy.org.au

EISLEY, B. and R. HAMMOND. 2007. Control of insect pests of field crops. 38 p. Bulletin 545 Agdex 100/622. The Ohio State University. <http://ohioline.osu.edu/b545/pdf/b545.pdf>

EVANS, L.T. 1975. The physiological basis of crop yield. In: Evans. L.T. *Crop Physiology*. Cambridge University Press. pp 327-355.

EVANS L.T. 1993. *Crop Evolution, Adaptation and Yield*. CUP, Cambridge, MA, USA. pp 288-89

EVANS, L.T Y R. A. FISHER. 1999. Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance. *Crop Sci.* 39:1544–1551

EVENSON, ROBERT E. and GOLLIN, DOUGLAS. 2003a. Crop variety improvement and its effect on productivity. The impact of international agricultural research. CABI Publishing. Wallingford, GB. 2003. 522 p.

EVENSON, ROBERT E. and GOLLIN, DOUGLAS. 2003b. Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science* 300 (5620): 758 - 762

FAGERIA, N.K. AND V.C. BALIGAR. 2005 Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *Advances in Agronomy* Volume 88:97-185

FAIRHURST, TH.; WITT, C. 2002. *Rice: A Practical Guide for Nutrient Management*. Singapore and Los Baños: Potash and Phosphate Institute & Potash and Phosphate Institute of Canada and International Rice Research Institute.

FAO. 2007. FAO statistical data base.
<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>

FAO. 2009. FAO statistical data base.
<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>

FAR. 2010. NZ grower maintains world record for wheat. *Harvest Snippets* Issue 7.

FARQUHAR, G.D., VON CAEMMERER, S., BERRY, J.A. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149, 78-90

FARQUHAR, G.D., VON CAEMMERER, S, 1982. Modeling of photosynthetic response to environmental conditions. In: Encyclopedia of plant physiology, vol. 12B: Physiological plant ecology II, pp. 549-587, Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B., Ziegler, H., eds. Springer, Berlin Heidelberg New York

FERNADEZ del P., M. 1995. Fertilización nitrogenada y su eficiencia en maíz de grano. *Simiente*: 65 (1-3): 122-132

FICK, G.W. , LOOMIS, R.S. AND WILLIMAS, W.A. 1975. Sugar Beet. In: Evans. L.T. *Crop Physiology*. Cambridge University Press. pp 259 - 295.

FINGER, R. and W. HEDIGER 2008. The Application of Robust Regression to a Production Function Comparison. *The Open Agriculture Journal*, 2008, 2, 90-98

FISHER, RONALD A. 1925. *Statistical Methods for research Workers*. Oliver and Boyd. Edimburg.

FISCHER, R.A. 1983. Wheat. p. 129–154. In W.H. Smith and J.J. Banta (ed.) *Potential productivity of field crops under different environments*. IRRI, Los Baños , Philippines.

FISCHER, R.A., AND L.T. EVANS. 1999. Yield potential: its definition measurement and significance. *Crop Sci*. 39:1544–1551

FISHER, R.A. 2007. Farrer Oration 2007. Presentado en el *Discovery Centre CSIRO, Canberra*, por el autor cuando se le confirió la medalla Farrer el 14 de Agosto del 2007

FISCHER, R.A, BYERLEE, D. and G.O. EDMEADES, 2009. Can technology deliver on the yield challenge to 2050?. *FAO Expert Miting on How to Feed the World in 2050*. 24-6 June 2009

FISCHER R. A. and G.O. EDMEADES. 2010. Breeding and Cereal Yield Progress. *Crop Science* 50: s85-s98.

FLORES P. 2007. Requerimiento de frío en frutales efectos negativos sobre la producción de fruta (Primera parte). *Agromensajes* 23: 13-14 Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Rosario. Argentina

FORRESTER, J.W. 1961. *Industrial Dynamics*. MIT Press Cambridge, Mass.

FORRESTER, J.W. 1968. *Principles of systems*. Wright-Allen Press, Inc. Cambridge, Massachussetts. 352 p.

FUGLIE, K. 2008. Is a slowdown in agricultural productivity growth contributing to the rise in commodity prices? *Agricultural Economics* 39: 431–441.

FUGLIE, K. 2009. Agricultural productivity in sub-Saharan Africa. Paper presented at the Cornell University Symposium on The Food and Financial Crises and Their Impacts on the Achievement of the Millenium Development Goals, May 1-2, 2009, Ithaca, New York.

GLOVER, N.D., 2000. Effects of Photoperiod on the Development of Beef Replacement Heifers from Weaning until First Lactation. Thesis. University of Manitoba. Winnipeg, Manitoba.

GHIDIU, G. 2010. Drip delivers control. American Vegetable Growers. April. 2010.
<http://growingproduce.com/americanvegetablegrower/?storyid=3605>

GOUDRIAAN, J. and H.H. VAN LAAR. 1994. Modeling potential crop growth processes (text book with exercises), Kluwer. Academic Publishers, Dordrecht.

GOUDRIAAN, J. 1995. Predicting crop yield under global change. In : B.H. Walker and W. Steffen (eds.) Global changes and terrestrial ecosystems. International Geosphere-Biosphere Programme Book Series #2, 260-274. Cambridge: Cambridge University Press.

GOODALL, D.W. 1976. The hierarchical approach to model building. P 10-21. In : G.W. Arnolds and C.T. de Wit (eds.) Critical evaluation of system analysis in ecosystems research and management. Pudoc, Wageningen, Netherlands

HAAPAL, H. 1995. Position dependent control of plant production. Agric. Sci. Finland 4(3): 239-350.

HANSON, H., BORLAUG N.E. y R.G. ANDERSON. 1982. Trigo en el tercer mundo. Centro Internacional del mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). El Batán, Mexico. 166 p,

HARMSSEN K. 2000a. A modified Mitscherlich equation for rainfed production in semi-arid areas: 1.- Theory. Neth. Jour. Agr. Sci. 48:237-250.

HARMSSEN K. 2000b. A modified Mitscherlich equation for rainfed production in semi-arid areas: 2.- Case study in Syria. Neth. Jour. Agr. Sci. 48:237-250.

HARLEY, P.C., WEBER J.A. and D.M. GATES. 1985. Interactive effects of light, leaf temperature, CO₂ and O₂ on photosynthesis in soybean. Planta 65: 249-263

HAY R.K.M. 1995. Harvest index – a review of its use in plantbreeding and crop physiology. Annals of Applied Biology **126**, 197–216.

HEWSTONE, M. C. 1997. Los cambios genéticos y agronómicos que incrementaron los rendimientos del trigo en Chile. pp 21-57. En: Explorando altos rendimientos de trigo, Kohli, M.M. y Martino L. Eds. CIMMYT, INIA La Estanzuela. Colonia, Uruguay. 338 p.

HILLEL, D., ROSENZWEIG C. 2005. The Role of Biodiversity in Agronomy. Advances in Agronomy Volume 88, Pages 1-385 (2005):1-34

HODSON D. and J. WHITE. 2010. GIS and Cop simulation modelling application in climate change research. In Climate change and crop production (M.P. Reynolds, ed.) pp 245-262

HOWELL, T. A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. Agron. J. 93:281-289

HUNT, R. 1990. Plant growth curves the functional approach to plant growth analysis. Edward Arnold. London, UK.

IBM, 1975. Continuous System Modeling Program III. General system information manual (GH19-7000) and users manual (SH19-7001-2). IBM Data Processing Division, White Plains, New York.

IIZUMI, T., M. YOKOZAWA and NISIMORI, M., 2009. Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: application of a Bayesian approach. *Agricultural and Forest Meteorology* 149 (2), 333–348. Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt

INES, A. V. M., P. DROOGERS, I. W. MAKIN, and A. DAS GUPTA. 2001. Crop growth and soil water balance modeling to explore water management options. IWMI Working Paper 22. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 26 p.

INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE. 2007. Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management is available. London: Earthscan and Colombo. International Water Management Institute.

JAGGARD, K.W., QI, A. and E.S. OBER. 2010. Possible changes to arable crop yields by 2050. *Phil. Trans. R. Soc. B* (2010) 365, 2835–2851.J

JONGSCHAAP R. 2006 Integrating crop growth simulation and remote sensing to improve resource use efficiency in farming systems. Wageningen University dissertation no. 3951

KANDEL, E. R. 2006. In search of memory. The emergence of a new science of mind. 510 p.

KNODEL JANET J., BEAUZAY P., BOETEL M and DENISE MARKLE. 2009. 2009 Field Crop Insect Management Guide. 9 p.
<http://www.ag.ndsu.edu/pubs/plantsci/pests/e1143w1.htm>

LADYMAN James and LAMBERT James 201.1 What is a Complex System? 39 p.
philsci-archive.pitt.edu/9044/4/LLWultimate.pdf

LAFITTE, H. R. and R. S. LOOMIS· 1988. Calculation of Growth Yield, Growth Respiration and Heat Content of Grain Sorghum from Elemental and Proximal Analyses .*Annals of Botany* 62: 353-361, 1988.

LAW, B. E., AND R. H. WARING. 1994. Remote sensing of leaf area index and radiation intercepted by understory vegetation, *Ecological-Applications*, 1994, 4:2, p, 272-279; 39 ref.

LAWRENCE PAULRAJ K. Y KRIPA RAM KOUNDAL, 2002. Plant protease inhibitors in control of phytophagous insects. *EJB Electronic Journal of Biotechnology*. 5(1) :1-17.
<http://www.scielo.cl/fbpe/img/ejb/v5n1/03/bip/>

LEDFORD HEIDI, 2008. Human genes are multitaskers. *Nature*. Published online 2 November 2008

LETELIER, E. y MARTINEZ, M. 1980. Estimación del nitrógeno fijado por una pradera mixta trébol rosado/pasto ovillo en suelos de la serie Santiago. *Agric. Técnica* 40 (1) : 21-25

LI, YONG, WHITE ROBERT , CHEN DELI, ZHANGB JIABAO, LI BAOGUO, ZHANG YUMING, YUANFANG HUANG AND ROBERT EDIS. 2007. A spatially referenced water and nitrogen management model (WNMM) for (irrigated) intensive cropping systems in the North China Plain. *Ecological Modelling*. 203(3-4):395–423

LIEBSCHER, G. 1895. Study of the determination of the fertilizer needs of agricultural soils and crops (In German). *Journal fuer Landwirtschaft* 43:49-216.

LINIGER, W. and R. WILLOUGHBY. 1970. Efficient integration methods for stiff systems of ordinary differential equations. *SIAM Jour. Num Anal.* 7(1): 47

LIU J., WILLIAMS, J.R., ZEHNDER, A.J.B. and YANG H. 2007a. GEPIC - modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale, *Agricultural Systems*, 94(2): 478-493.

LIU J., WIBERG D., ZEHNDER A.J.B. AND YANG H. 2007b. Modelling the role of irrigation in winter wheat yield, crop water productivity, and production in China, *Irrigation Science*, 26 :21-33.

LIU YANG-YU, SLOTINEF J.J and BARABAS A.L. 2013 Observability of complex systems. *PNAS* 110(7) 24460- 2465

LIZASO, J.I., BOOTE K.J., CHERR C.M., SCHOLBERG J.M.S., CASANOVA J.J., JUDGE J., JONES J.W. and G. HOOGENBOOM. 2007. Developing a Sweet Corn Simulation Model to Predict Fresh Market Yield and Quality of Ears. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 132: 415-422.

LONGPING, YUAN. 2004. Hybrid rice technology for food security in the world. FAO rice conference. Rome, Italy, 12-13 February 2004.
<http://www.fao.org/rice2004/en/pdf/longping.pdf>

LONG STEPHEN P., XIN-GUANG ZHU, SHAWNA L. NAIDU & DONALD R. ORT. 2006. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, Cell and Environment* **29**, 315–330

LOOMIS, R.S. 1971. Agricultural Productivity. *Ann. Rev. Plant Phys.* 22: 431-&

LOOMIS, R. S. and WILLIAMS, W. 1963. Maximum crop productivity : An estimate. *Crop Sci.* 3 : 67-72

LOOMIS, R.S., AND J.S. AMTHOR. 1996. Limits to yield revisited. p. 76–89. *In* M.P. Reynolds et al. (ed.) *Increasing yield potential in wheat: breaking the barriers*. CIMMYT, Mexico, D.F.

LOOMIS R. S. AND AMTHOR J. S.. 1999. Yield Potential, Plant Assimilatory Capacity, and Metabolic Efficiencies. *Crop Sci.* 39:1584–1596

LOOMIS R. S. and D.J. CONNORS. 2002. *Crop Ecology: Productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press.
http://books.google.cl/books?id=jYTLv1muPa4C&pg=PA328&lpg=PA328&dq=maiz+analisis+proximal,+tallo,+hojas+y+grano&source=bl&ots=qRc1FWob0h&sig=K-P2HvLGE7V-70xuD8P4XQen9UM&hl=es&ei=ybM0Tf2WO4P_8AaSmN3NCA&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=7&ved=0CEcQ6AEwBjgK#v=onepage&q&f=false

LOVELOCK, J. 2006. *La venganza de la tierra*. Planeta. 249 p.

MANGELSDORF, PAUL C. 1966. Genetic Potentials for Increasing Yields of Food Crops and Animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 56, No. 2 (Aug. 15, 1966), pp. 370-375

MARRIS, EMMA, 2008. Water: More crop per drop. Published online 19 March 2008. *Nature* 452, 273-277 (2008) DOI:10.1038/452273A

MARCOS, J., ALVA, A., STOCKLE C., TIMLIN D. and V. REDDY . 2004. CropSyst VB – Simpotato, a crop simulation model for potato-based cropping systems: I. Model development. 4th International Crop Science Congress.

MARTIN A. C. and J. ZALLINGER 2001. *Weeds (A Golden Guide from St. Martin's Press)* 160 p.

Mc DERMITT Y LOOMIS, R.S.1981. A new approach to the analysis of reductive and dissipative costs in nitrate assimilation. pp 639-650. In: Lyons, J.M. and others (eds.) *Symbiotic nitrogen fixation and conservation of fixed nitrogen*. Plenum Press, New York. 698 p.

MILLER P., FRED. 2008. After 10,000 Years of Agriculture, Whither Agronomy? *Agron. J.* 100:22–34 (2008)

MITSCHERLICH, E.A. 1909. The law of minimum and the law of diminishing soil productivity (in german) . *Landwirtschaftliche Jahrbuecher* 38: 537-552

MONOD, J. 19670. *Le hazard et la necesité*. Editions du Senil, Paris. 197 p.

MONTEITH, J.L. 1973. *Principles of environmental Physics*. 241 pp. Edwars Arnolds. London.

MONTEITH J.L., 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agronomy Journal* 88: 695-697 p.

MONTEITH J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 281, 277–294

MONSI, M. y SAEKI, T. 1953. Über den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Jap. Jour. Bot. 14: 22-52.

NAEEM MUHAMMAD, MUHAMMAD SHAHID MUNIR CHOCHAN, AHMAD HASSAN KHAN and RIAZ AHMAD KAINTH. 2006. Green fodder yield performance of oats varieties under irrigated conditions J. Agric. Res., 2006, 44(3):197-201.

NAIR S G. AND M. UNNIKRIISHNAN. 2007. Recent Trends in Cassava Breeding in India. Gene Conserve 6(44): 370-386

NIGAM, S.NPALMER., B., SAN VALENTIN G., KAPUKHA P., PIGGIN C., and B. MONAGHAN. 2003. Groundnut: ICRISAT and East Timor. Agriculture: New Directions for a New Nation — East Timor (Timor-Leste). Edited by Helder da Costa, Colin Piggim, Cesar J da Cruz and James J Fox. ACIAR Proceedings No. 113. (printed version published in 2003)

NOBEL, PARK S. 1974 Biophysical plant Physiology. Freeman and Company. San Francisco. 488 p.

NOVIKOV, A.E AND E.A. NOVIKOV. 2010. Numerical integration of stiff systems with low accuracy. Mate. Mod. 22(1): 45-56.

NOVOA, R. y LOOMIS , R.S. 1981a . Nitrogen and plant production. Plant and Soil 58: 177-204

NOVOA, R. y LOOMIS , R.S. 1981b. Modelo dinámico del metabolismo del Nitrógeno en plantas superiores. I. Descripción del modelo. Agric. Técnica 41(1):41-48.

NOVOA, S.A., R. 1986. Principios elementales de agricultura. Inves. y Progres. Agrícola La Platina. 33:22-24.

NOVOA, R. 1987. Modelo de simulación dinámica de un cultivo de trigo y su utilidad práctica. Simiente 57(4):236-243

NOVOA, R. 1989a. Fertilización del cultivo de trigo. Aspectos básicos. IPA La Platina 53: 11- 14

----- **1989 b.** Fertilización según balance nutricional. Aspectos prácticos en trigo. Invest. y Progres. Agric.. La Platina 54:38-42.

NOVOA, RAFAEL y G. HERRERA. 2002 Uso del análisis de imágenes en el diagnóstico del “Virus de la tristeza de los cítricos” en limoneros, Valle de Mallerauco. Agric. Tec. 60 (4): 606-615.

NOVOA, S.A., R. 2004. Nuevos desarrollos agronómicos para incrementar el uso eficiente del agua. Simiente 74(1-2): 7- 25. Chile

NOVOA, R. y E. LETELIER. 1987 Efecto del rocío en la economía del agua del suelo y la producción de trigo bajo condiciones de secano Agricultura Técnica Chile INIA. 47(3) 299-301

OLIVER S. N., E. FINNEGAN E.J., DENNIS E., PEACOCK W. J., and BEN TREVASKIS. 2009. Vernalization-induced flowering in cereals is associated with changes in histone methylation at the VERNALIZATION1 gene. PNAS 106 (20): 8386-8391.

OERKE, E, C. 2006. Crop losses to pests. The Journal of Agricultural Science 144 (1) 31-43

ORTEGA-FARIÁS, SAMUEL, CALDERÓN, RODRIGO, MARTELLI, NELSON ET AL. 2004. Evaluación de un modelo para estimar la radiación neta sobre un cultivo de tomate industrial. Agric. Téc., 2004, 64(1): 41-49

PARKER, R. y LABRADA C. 1996. El control de malezas en el contexto del manejo integrado de plagas. En : Manejo de Malezas para Países en Desarrollo. (Estudio FAO Producción y Protección Vegetal - 120) R. Labrada, J.C. Caseley y C. Parker. FAO Roma.

PASSIOURA, J.B. 1973. Sense and nonsense in crop simulation. J. Austr. Agric. Sci. 39:181-183.

PASSIOURA, J.B. 1996. Simulation models : Science, Snake oil, Education or Engeneering ? Agron. Jour. 88 (5) : 690-694

PAVLISTA, A. 2002. Nebraska's Potato Industry 1985-2000. Potato eyes Vol. 14, Issue 3, Autumn 2002

PEDIGO L. P. and MARLIN RICE. 2008. Entomology and Pest Management, Prentice Hall. 816 p. http://www.amazon.com/Entomology-Pest-Management-Larry-Pedigo/dp/0135132959/ref=pd_sim_b_1 - #

PENNING de VRIES, F. W. T., A.H. M. BRUSTING AND H.H. van LAAR. 1974. Products, requirements and efficiency of biosynthesis: A quantitative approach. J. Theor, Biol. 45 : 330 – 377.

PENNSTATE 2008-2009. Tree Fruit Production Guide. 248 p. College of Agricultural Sciences, AGRS -045. <http://tfpg.cas.psu.edu/>

PING HE , LI SHUTIAN, AND JIN JIYUN . 2009. Nutrient uptake and utilization of nutrient management for wheat and maize rotation system in North Central China. Proceeding of the international plant nutrition colloquium. UCD. Davis

PINTO, A., ENGLISH H., ALVAREZ M. 1994. Principales enfermedades de los frutales de hoja caduca en Chile. 311p. INIA. Santiago Chile.

POLLARD, KATHRINE S. 2009. What makes us human? Scientific American. May 2009.

PRICE T. DOUGLAS. 2009. Ancient farming in eastern North America. PNAS 106 (16): 6427–6428

RAJARAM S. and H.-J. BRAUN 2006. Wheat Yield Potential. Wheat Yield Potential Conference – CIMMYT. Obregon. Mexico.

RAUN, W.R., and G.V. JOHNSON. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. Agronomy Journal 91: 357-363.

REDINBAUGH M. G. and W.H. CAMPBELL. 1981. Purification and characterization of NAD(P)H: nitrate reductase and NADH: nitrate reductase from corn Roots. Plant Physiol. 68:115-120.

REGANOLD, J. P. and DAVID R. HUGGINS. 2008. No-Till: How Farmers Are Saving the Soil by Parking Their Plows. Scientific American on line, June 2008.

REVEDINA ANNA, ARANGURENB B., BECATTINIA R., LONGOC L., MARCONID E., MARIOTTI M., SKAKUNF N., SINITSYNF A., SPIRIDONOVAG E., and JI_RÍ SVOBODAH. 2010. Thirty thousand-year-old evidence of plant food processing. PNAS 107 (44) :18815-18819

RITCHIE, J.T, GODWIN, D.C. and OTTER-NACKE, S. 1985. CERES-wheat. A simulation model of weath growth and development. Texas AM Univ. Press, College Station.

RODRIGUEZ, J. 1990. La fertilización de los cultivos: un método racional. 406 pp

RODRÍGUEZ, B. C, SEVILLANO F. G. Y P. SUBRAMANIAM. 1984. La fijación de nitrógeno atmosférico. Una biotecnología en la producción agraria. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología. 65 p.

RHOADES, J.D., CHANDUVI, F. AND S. LESCH. 1999. Soil salinity assessment. FAO irrigation and drainage paper 57. Rome. 131 p.

ROSE, C.W. Agricultural Physics. Pergamon Press. London. 230 p.

ROY , R.N. , A. FINCK, G.J. BLAIR AND H.L.S. TANDON. 2006. Plant Nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management. FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin 16. Rome.

RUSH, CHARLES M., H.-Y. LIU, R. T. LEWELLEN, R. ACOSTA-LEAL. 2006. The Continuing Saga of Rhizomania of Sugar Beets in the United States. Plant Disease 90 (1): 4-15

SAEKI, T. 1960. Interrelationship between leaf amount, leaf distribution and total photosynthesis in plant communities. Bot. Mag. Tokyo 73, 55-63

SALISBURY, F. B. 1991. Lunar Farming: Achieving Maximum Yield for the Exploration of Space. *HORTSCIENCE*, Vol. 26(7): 827-833, July 1991

SCHULTZ, T. R. and S.G. BRADY. 2008. Major evolutionary transitions in ant agriculture. *Proceedings of the National Academy of Science*. 105(14): 5435–5440

SEXTON, P., BOME M.G., BAFLIS R.R, KAROW R., MARX E., and TOM SHIBLEY. 1999. Nitrogen rate and timing effect on irrigated liard red spring wheat: 1999 on-farm trials in central Oregon. <http://oregonstate.edu/dept/coarc/nrt.htm>

SINCLAIR, T. R. 1994. Limits to Crop Yield? Pages 1 509-532 in K. J. Boote, J. M. Bennett, T. R. Sinclair and G. M. Paulsen (editors) *Physiology and Determination of Crop Yield*. Crop Science Society of America, Madison, WI, USA.

SINCALIR, T. and DE WIT, C.T. 1975. Photosynthate and nitrogen requirements for seed production by various crops. *Science*, 189: 565-567.

SINCLAIR, T.R and N,G. SELIGMAN, 1996. Crop modeling from infancy to maturity. *Agr. Jour.* 88: 698-704.

SINHG, U.; BRINK, J.E.; THORNTON, P.K. AND CHRISTIANSON, C.B. 1993. Linking models with geographic information system to assist desicionmaking: a prototype for the indian semiarid tropics. IFDC Paper Series IFDC-P-19 39 pp.

SPILLMAN, W.J. 1923. Application of the law of diminishing returns to some fertilizer and feed data. *Jour,Far. Econ.* 5 ;35-52

STEDUTO, P., HSIAO T.C., RAES D. and E. FERERES. 2009. AquaCrop- The FAO crop model to simulate yield Response to water. I. Concepts and Undelying Principles. *Agron. Jour.* 101: 426-437.

STEWART, J.I., HAGAN, R.M., 1973. Functions to predict effects of crop water deficits. *J. Irr. Drain. Div. ASCE* 99,421-439.

STEWART, J.I., DANIELSON, R,E., HANKS, RT, JACKSON, E.B., HAGAN, R.M., PRUITT, W.O., FRANKLIN, W.T., RILEY, J.P., 1977. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. *Utah Water Research Lab. PR.* 151-1, Logan, Utah, 191 pp.

STEWART SCOTT, RUSS PATRICK, PROFESSOR, ANGELA MCCLURE.2009. Insect Control Recommendations for Field Crops. 44 p. University of Tennessee. http://www.utextension.utk.edu/fieldcrops/cotton/cotton_insects/pubs/PB1768.pdf

STEWART G. R. AND T. O. OREBAMJO. 1979. Some Unusual Characteristics of Nitrate Reduction in *Erythrina senegalensis* DC. *New Phytologist*, 83 (2): 311-319

TABASHNIK BRUCE, BREVAULT THIERRY AND YVES CARRIERE. 2013. Insect resistance to Bt crops: lessons from the first billion acres, *Nature Biotechnology* 31, 510–521

TAIZ, LINCOLN y ZEIGER, EDUARDO 1998. Plant Physiology. 792 p. Sinauer Associates, Inc. Publishers. Sunderland, Massachusetts.

TAUB, DANIEL R. 2010, Effect of rising atmospheric concentration of carbon dioxide on plants. Nature Education Knowledge 3(10):21.

THIRTLE, C.G. 1985. Technological Change and the Productivity Slowdown in Field Crops: United States, 1939-78, Southern Journal of Agricultural Economics, 17 (Dec.) pp. 33-42.

THOM, A.S. 1975. Momentum, Mass and heat exchange of plant communities. pp 57 -109. In: Monteith, J.L. (ed.) Vegetation and the Atmosphere. Academic Press 278 p.

THORNLEY, J.H.M AND JOHNSON, I.R. 1990. Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology. Oxford Sci. Publ. Clarendon Press, Oxford.

TOURNAIRE-ROUX, C.; M. SUTKA; H. JAVOT, E. GOUT, P. GERBEAU, DT LUU ; R. BLIGNY Y C. MAUREL. 2003. Cytosolic pH regulates root water transport during anoxic stress through gating of aquaporins. Nature 425, 25 September, pp 393-397

TRIPLETT, Jr. G. B. and A. D. WARREN. 2008. No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture! Agron. J. 100: S-153–S-165.

UNDERDAHL, J., M. MERGOU, J.K. RANSOM AND B.G. SCHATZ. 2008. Agronomic traits improvement and associations in hard red spring wheat cultivars released in North Dakota from 1968 to 2006. Crop Sci. 48:158–166.

UNIVERSIDAD TÉCNICA SANTA MARÍA. 2007. Evaluación del Potencial Productivo de Biocombustibles en Chile con Cultivos Agrícolas Tradicionales. Centro Avanzado de Gestión, Innovación y Tecnología para la Agricultura. Marzo, 2007. 148 p.
http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/servicios-informacion/publica/Potencial_productivo_biocombustibles_en_Chile.pdf

USDA. 2000. Report on the Status of Medicago Germplasm in the United States - October 2000. National Plant Germplasm System.
http://www.ars-grin.gov/npgs/cgc_reports/alfalfa/alfalfacgc2000.htm

VAN GINKEL, M., I. ORTIZ-MONASTERIO, R. TRETOWAN, AND E. HERNÁNDEZ. 2001. Selecting for improved N use efficiency in bread wheat.
http://www.cimmyt.org/Research/Wheat/Symp_Kronstad/posters/poster18_GinkMonas>Select_improved.htm

VAN KEULEN, H. 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Centre for agricultural publishing and documentation. Wageningen. 176 p.

VAN KRAALINGEN D.W.G. 1995. The FSE system for crop simulation: version 2.1. Quantitative Approaches in Systems Analysis Report 1. Wageningen (Netherlands): C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and AB-DLO. 58 p.

VIETS, F.G. 1962. Fertilizers and the efficient use of water. *Adv. Agron.* 14:223-264

VILLAGRÁN, N. y NOVOA, RAFAEL 2002. Estimación de niveles de nitrógeno en maíz por medio de análisis de imágenes. *Tierra Adentro Chile INIA.* 46:12-15.

VILLAGRÁN, R. 2003. Exploración del uso de imágenes de alta resolución para el diagnóstico de problemas agronómicos en vides. Tesis. Universidad Iberoamericana de Ciencia y Tecnología. Santiago.

VILLASMIL P. JOSÉ J. 1973. Conceptos Económicos y Estadísticos en la Experimentación con Fertilizantes. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)* 2(3):41-62

VOORTMAN R.L. AND J. BROUWER. 2001. An empirical analysis of the simultaneous effects of nitrogen, phosphorus and potassium in millet production on spatially variable fields in sw niger Staff Working Paper WP - 01 - 04 August. 46 p.
<http://www.sow.vu.nl/pdf/wp01-04.PDF>

VUCETIC, V. 2011. Modelling of maize production in Croatia: present and future climate. *Journal of Agricultural Science* 149(2):145-157,

WAGGONER, J.P. 1975. Micrometeorological models. 205 - 228. In: Monteith, J.L. (ed.) *Vegetation and the Atmosphere.* Academic Press 278 p.

WALLACH, DANIEL. 2011. Crop Model Calibration: A Statistical Perspective. *Agr. Journal.* 103 (4):1144-1151

WEN-GE WU, HONG-CHENG ZHANG, YING-FEI QIAN, YE CHENG, GUI-CHENG WU, CHAO-QUN ZHAI AND QI-GEN DAI. 2008. Analysis on Dry Matter Production Characteristics of Super Hybrid Rice. *Rice Science* 15(2): 110-118.

WILCOX CHRISTIE. 2012. Are lower pesticide residues a good reason to buy Organic?. Probably not. *Scientific American.* September 24, 2012.
<http://blogs.scientificamerican.com/science-sushi/2012/09/24/pesticides-food-fears/>

WILCZEK, FRANK. 2008. The lightness of being. Basic Books, New York. 270 p.

WILLERS. 2004. GOSSYM: The Story Behind the Model.
pestdata.ncsu.edu/cottonpickin/models/GOSSYM.pdf

WHITMARSH JOHN AND GOVINDJEE. 1999. The Photosynthetic Process_In: "Concepts in Photobiology: Photosynthesis and Photomorphogenesis", Edited by GS SINGHAL, G RENGER, SK SOPORY, K-D IRRGANG AND GOVINDJEE, 1999. Concepts in Photobiology: Photosynthesis and Photomorphogenesis. Narosa Publishers/New Delhi; and Kluwer Academic/Dordrecht, 994 p.

WRAY, J. L., AND R. J. FIDO. 1990. Nitrate reductase and nitrite reductase, p. 241-256. In P. J. Lea [ed.], *Enzymes of primary metabolism.* Academic.

YANG ZHENGYU, GAIL WILKERSON, BUOL, G.S., BOWMAN, D.T. and R.W. HEINIGER. 2009. Estimating Genetic Coefficients for the CSM-CERES-Maize Model in North Carolina Environments. *Agron J.* 101:1276-1285.

YEATES, NTM. 1955. Photoperiodicity in cattle. I. Seasonal changes in coat character and their importance in heat regulation. *Australian Journal of Agricultural Research* 6(6) 891 – 902

YIN XINYOU AND HH Van LAAR 2005. Crop Systems Dynamics: An Ecophysiological Simulation Model for Genotype by environment interactions. Wageningen Academic Publisher, The Netherlands 152 p.

YEATES, NTM. 1957 Photoperiodicity in cattle. II. The equatorial light environment and its effect on the coat of European cattle *Australian Journal of Agricultural Research* 8(6) 733 - 739

ZAGAL, ERICK V. 2005. El ciclo del nitrógeno en el suelo. *Revista Ciencia Ahora* N° 16: 103-116. <http://www.ciencia-ahora.cl/Revista16/14ElCicloDelNitrogeno.pdf>.

ZEDER, A, MELINDA. 2008. Domestication and early agriculture in the Mediterranean Basin: Origins, diffusion, and impact. *PNAS* 105 (33): 11597–11604.