

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE CIENCIAS AGRICOLAS



**DESARROLLO DE TECNOLOGÍA DEL USO DE SENSORES PARA
LA FERTILIZACIÓN DEL CULTIVO TRIGO (*Triticum aestivum* L.)
EN EL VALLE DE MEXICALI, B. C., MÉXICO
TESIS**

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL TITULO DE:**

INGENIERO AGRONOMO

**PRESENTA
ESTEBAN MARISCAL DOMINGUEZ**

**DIRECTOR
DR. JESÚS SANTILLANO CÁZARES**

Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, 23 de marzo de 2015

Desarrollo de Tecnología del uso de Sensores para la fertilización del cultivo trigo
(*Triticum aestivum* L.) en el valle de Mexicali B.C. México

TESIS

Sometida a la consideración del programa de Ingeniero Agrónomo

del

Instituto de Ciencias Agrícolas

Por

Esteban Mariscal Domínguez

Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, 23 de marzo de 2015

Esta tesis fue realizada bajo la dirección del comité tutorial, aprobada y aceptada como requisito parcial para la obtención del título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ESPECIALISTA EN FITOTÉCNIA

COMITÉ TUTORIAL:

DR. JESÚS SANTILLANO CÁZARES

DIRECTOR

DR. FIDEL NÚÑEZ RAMÍREZ

ASESOR

M.C. CARLOS CECEÑA DURÁN

ASESOR

DR. DAVID CALDERÓN MENDOZA

ASESOR

AGRADECIMIENTOS

A mis queridos padres que siempre me apoyaron en mis estudios como profesionista, familia y amigos que estuvieron alentándome cuando más los necesitaba, gracias también a mis Maestros por sus enseñanzas durante mi desarrollo como profesional.

Al Dr. Jesús Santillano Cazares por la atención brindada durante mi paso como becario, así como la atención para la conclusión de esta tesis.

Al M.C Carlos Ceceña Duran que en todo momento estuvo al pendiente de mis avances, orientándome para poder sacar adelante este sueño.

Al Dr. David Calderón Mendoza agradeciendo su conocimiento brindado en el asesoramiento, revisión de la tesis.

Al Dr. Fidel Núñez Ramírez gratitud por la atención y la gran ayuda para poder sacar adelante la investigación.

A todas a aquellas personas que de manera externa ayudaron con la investigación se los agradezco.

Gracias por su apoyo

DEDICATORIA

Se la dedico a mis padres Esteban Mariscal Mariscal, y mi madre Celida Domínguez Cota ya que tuve un apoyo incondicional para poder lograr una meta en mi vida.

A mi tía Lorena Mariscal Bobadilla por su apoyo incondicional, en mi estancia de estudio en Mexicali, por estar al pendiente de mí.

A mi Hermana Yadira Domínguez Cota que siempre estuvo ayudándome, orientándome en mi carrera profesional.

A mi novia Ana Villa que siempre estuvo al pendiente de mi desempeño académico.

A Dios por darme fortaleza, conocimientos, ingenio, para salir adelante con mi sueño de convertirme en profesionista.

A Guadalupe Chiquito por sus enseñanzas, su apoyo, a toda su familia gracias pase grandes momentos, en mi estancia en Ejido Nuevo León, Mexicali B.C.

Muy Agradecido

Esteba Mariscal Domínguez

INDICE DE CONTENIDO

Contenido	Pág.
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE CUADROS	ix
RESUMEN.....	1
I. INTRODUCCIÓN	2
II. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo general	4
2.2. Objetivo en específico	4
III. HIPÓTESIS.....	5
3.1. Hipótesis nula.....	5
3.2. Hipótesis alterna.....	5
IV. REVISION DE LITERATURA.....	6
4.1. Orígenes del cultivo trigo y su desarrollo en México	6
4.2. Descripción botánica del trigo	8
4.3. Vías de pérdida de nitrógeno	9
4.3.1. Pérdidas de nitrógeno por lixiviación	10
4.3.2. Pérdidas de nitrógeno por volatilización.....	11
4.3.3. Pérdidas de nitrógeno por desnitrificación	12
4.4. Uso de sensores ópticos (GreenSeeker®) y fases de implementación.....	14
4.4.1. Calibración	15
4.4.2. Validación	16
4.4.3. Transferencia de tecnología.....	17

Contenido	Pág.
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
5.1 Localización del área experimental.....	18
5.2. Manejo Agronómico	20
5.3. La franja rica y su función	21
5.4. Variables de interés y forma de medirlas.....	22
5.5. Diseño experimental.....	24
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
VII. CONCLUSIONES.....	38
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Pág.
Figura 1. Relación entre el rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali en el ciclo agrícola 2009-2010.....	26
Figura 2. Relación entre el rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali en el ciclo agrícola 2010-2011.....	28
Figura 3. Relación entre rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali en el ciclo agrícola 2010-2011 y 2011-2012.....	33
Figura 4. Relación entre rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali en el ciclo agrícola 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013.....	35
Figura 5. Relación entre rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali en el ciclo agrícola 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 y 2013-2014.....	37

ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Pág.
Cuadro 1. Rendimiento medido, predicho mediante un algoritmo, porcentaje del rendimiento medido y coeficiente de determinación (r^2) de cinco experimentos de calibración en el valle de Mexicali, B.C., México, en el ciclo 2010-2011.....	30

RESUMEN

El cultivo de trigo es el que más superficie ocupa en el Valle de Mexicali ciclo otoño-invierno, generando un intercambio de divisas, fuente de empleo para muchas familias, cabe destacar que es importantísimo en la alimentación de la humanidad, ya que se realizan diversos productos con el grano del trigo. La importancia de esta investigación radica en incrementar el uso eficiente del nitrógeno (N), con el apoyo del sensor óptico (Green Secker®). Debido a los altos costos elevados de fertilizantes, la falta de rentabilidad del cultivo, los problemas de contaminación al ambiente, impacto a la economía del productor, por estas razones realizamos la siguiente investigación. La investigación se realizó con la ayuda del sensor óptico (Green Secker®). Se realizaron experimentos de calibración en el Valle de Mexicali, B.C., México en el Instituto de Ciencias Agrícolas (ICA) – UABC. Se establecieron experimentos de calibración en los ciclos agrícolas 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013, y 2013-2014. En 2009-2010, se obtuvo una distribución aleatoria, no existió una tendencia lógica entre las dos variables, rendimiento medido de grano y rendimiento estimado durante la temporada (INSEY, por sus siglas en inglés). En los siguientes ciclos agrícolas, se desarrollaron modelos de predicción lógicos, siendo la última versión: $\text{Rendimiento Estimado} = 1.08e^{135.13 (\text{INSEY})}$, con $R^2 = 0.81$. A la postre, este modelo demostró ser confiable para la estimación de los rendimientos y como herramienta confiable para producir recomendación de fertilizante óptimas para la región.

I. INTRODUCCIÓN

En México la superficie de siembra del cultivo de trigo (*Triticum* spp.) es de alrededor de 600,000 ha (SIAP 2013). En el Valle de Mexicali, Baja California, México, este cultivo de trigo es el que más se siembra, ocupando una superficie de cerca de 100 mil hectáreas, con un rendimiento aproximado de 6.6 ton ha⁻¹ (INIFAP, 2010). La producción del trigo se considera como una cadena prioritaria, generando una derrama económica muy importante para el sector agrícola, con un valor de producción de 1, 733, 077 (miles de pesos). Además, la producción de trigo genera alrededor de 3,800 empleos en la región (Fundación Produce 2012-2013). Por estas razones, el cultivo de trigo en Baja California es importante para incentivar la actividad económica y mantener la paz social.

No obstante la importancia de la producción de trigo en Baja California, la continuidad de esta actividad se encuentra comprometida, ya que los productores atraviesan una crisis económica debido a la baja rentabilidad de este cultivo. Los costos elevados de fertilizantes, en especial los que están formulados con nitrógeno (N), representan el insumo agrícola más significativo del costo de producción total para el productor. Irónicamente, no obstante el alto costo de los fertilizantes nitrogenados para la producción, los productores de trigo en el Valle de Mexicali podrían estar aplicando más fertilizantes de los necesarios para lograr los máximos rendimientos, haciendo insostenible este sistema de producción. Aplicaciones por encima de lo necesario para la producción agrícola, provocan

pérdidas económicas y ambientales; ya que el nitrógeno se puede perder por una serie de procesos tales como lixiviación, desnitrificación, volatilización (Flores, 2011).

II. OBJETIVOS

2.1. *Objetivo general*

El objetivo general de la línea de investigación sobre el uso de sensores ópticos para la fertilización óptima de trigo es generar recomendaciones de fertilizantes nitrogenados que permitan reducir los costos de producción del cultivo trigo así como reducir el impacto ambiental en el sistema de producción de trigo en Baja California. Es decir, transitar hacia un sistema sostenible de producción de trigo en el valle de Mexicali.

2.2. *Objetivo en específico*

El objetivo específico de este trabajo es calibrar el sensor para generar un algoritmo para poder predecir los rendimientos del cultivo de trigo en el valle de Mexicali.

III. HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis nula

Ho: No se encontrará relación entre los rendimientos estimados y los rendimientos observados, lo cual impedirá el desarrollo de un algoritmo para la fertilización de trigo en base a sensores en el valle de Mexicali.

3.2. Hipótesis alterna

Ha: Se encontrará una alta relación entre los rendimientos de trigo estimados y los rendimientos observados en el valle de Mexicali, lo cual permitirá el desarrollo de un algoritmo para la fertilización de trigo en base a sensores en el valle de Mexicali.

IV. REVISION DE LITERATURA

4.1. Orígenes del cultivo trigo y su desarrollo en México

El trigo es el cereal más cultivado en todo el mundo. Se han encontrado restos carbonizados de trigo de 6,700 años a.C., se cree que en aquellos siglos tan remotos las mujeres fueron las primeras agricultoras ya que cultivaban pequeñas superficies, mientras los hombres se dedicaban a la caza, pero fue hasta dos mil años antes de cristo, el trigo atravesaría Asia Occidental y Central y llegaría a China, hasta que las naves de Colon lo llevaron a América (Salas et al. ,2005). El trigo es importante debido a que es parte fundamental en la dieta alimenticia de todos los pueblos del mundo, puesto que su gluten sirve para hacer pan, galletas, tortillas, entre muchos otros alimentos.

Actualmente el cultivo de trigo se cultiva en gran parte del mundo. Según la FAO, se espera un incremento ascendente de un 1.3 por ciento durante el periodo de proyecciones a 679 millones de toneladas para el año 2010 en el mundo (FAO, 2004). El trigo en Baja California tienen una historia que se remota al periodo de los misioneros dominicos, quienes al hacer la conquista espiritual de los nativos de la península de Baja California trajeron las semillas; aunque posteriormente otros cereales hicieron su aparición debido a los cambios experimentados por la implementación del sistema de riego en todo el estado (Sánchez, 2002).

México es un importador neto en 2013 importó poco más de 4 millones de ton, el 60% del consumo en el país (FND, 2014). En México, el cultivo de trigo se siembra en más de 20 estados de la república, sin embargo el 80% de la producción se genera en la zona norte bajo condiciones de riego en el ciclo otoño-invierno, el resto en regiones del centro y altiplano central en ciclo primavera-verano bajo condiciones de temporal en su mayoría (Bautista et al., 2004). En México se cultivan principalmente las variedades de trigo cristalino (60%), suave (25%) y fuerte (14%). En el estado de Baja California es el cereal más cultivado. En 2010 se sembraron 101,161.00 ha, y se cosecharon 99,330.00 ha según (SIAP, 2010).

4.2. Descripción botánica del trigo

La raíz del trigo es fibrosa formada por numerosas raíces delgadas y por raíces secundarias que salen de los nudos inferiores del tallo bajo la superficie. El tallo es hueco con 3 a 6 nudos y entrenudos, el color es blanco o amarillo con altura promedio de 1.50 metros, aunque es variable, dependiendo de la variedad y condiciones ambientales. Tiene la capacidad de producir hijos o macollos primarios, cuyo número varía según la variedad, las hojas son lanceoladas y salen de cada nudo, están formadas por la vaina que abraza el nudo inmediatamente inferior, por el punto de unión se encuentran la lígula y las aurículas y por la lámina foliar. La inflorescencia del trigo es una espiga terminal paralelamente aplanada, presente a 10 a 30 espiguillas distribuidas en zigzag en el raquis, la espiguilla forma de 1 a 5 flores alternadas en lados opuestos de la raquilla. Una o dos flores superiores son estériles, la flor individual está formada por lema y la palea, 3 estambres, estigma, plumosos y bifurcado u ovario unicelular. El grano de trigo es un fruto indehiscente o cariopsis, formado por una semilla seca (Parra, 1980).

4.3. Vías de pérdida de nitrógeno

El nitrógeno se pierde fácilmente en el suelo o hacia la atmósfera por diferentes procesos. Con un alto contenido de nitrógeno en la planta, las hojas se tornan color verde oscuro demasiado jugosas y blandas, favoreciendo al acamado, debido a un debilitamiento de los tallos (Buckman y Brady, 1977). El nitrógeno presente en los suelos cultivables procede de materiales diversos como restos de cultivos, abonos verdes, estiércol, fertilizantes comerciales, nitratos aportados por las lluvias, así como la fijación de nitrógeno por microorganismos. Gran parte del nitrógeno así incorporado sufre grandes transformaciones antes de ser utilizado por los vegetales superiores. Las pérdidas de N en el suelo se deben a la absorción por las plantas, la lixiviación, volatilización, desnitrificación (García y García, 2013).

4.3.1. Pérdidas de nitrógeno por lixiviación

La lixiviación es el proceso por el cual ocurre un movimiento del agua en el perfil del suelo. El N se pierde en forma de nitratos (NO_3^-), ya que por su carga negativa no es retenido por la fracción coloidal del suelo. Por lo tanto el agua y nitratos disueltos en ella se mueven de forma descendente hacia los horizontes profundos. La lixiviación es afectada por varios factores, discutidos enseguida.

Temporada y clima: Pérdidas por lixiviación de nitrato son generalmente mayores durante las estaciones de frío que son otoño-invierno e inicios de primavera, meses cuando la absorción de la planta de nitrato es baja (Cameron et al., 2013).

Propiedades de suelo: Pérdidas de acuerdo a las propiedades del suelo, en especial la textura, teniendo mayor pérdida un suelo arenoso que uno arcillosos. En suelos arcillosos el tamaño de los poros es menor y por ellos, el agua y los nitratos se mueven más lento (Cameron et al., 2013).

Tipos de uso del suelo: Existen varios tipos de uso del suelo, donde la tasa de lixiviación es diferente. En general, la lixiviación ocurre, de menor a mayor, en bosques, pastizales de corte, pastizales de pastoreo, cultivos extensivos, cultivos hortícolas, respectivamente. La lixiviación más alta, en cultivos hortícolas, se presenta debido a las aplicaciones frecuentes y normalmente altas de fertilizantes de fuente nitrogenada (Cameron et al., 2013).

4.3.2. Pérdidas de nitrógeno por volatilización

La volatilización es un proceso el cual consiste en la pérdida de nitrógeno (N) hacia la atmosfera en forma de amoniaco (NH_3), óxido nitroso (N_2O), u óxidos o en forma de nitrógeno molecular (N_2). Este proceso depende de varios factores, tales como el pH del suelo, la temperatura, el contenido de (N) en el suelo, la capacidad de intercambio catiónico, la humedad, entre otros factores (Cameron et al., 2013).

Un suelo con un pH alto naturalmente pueden perder cantidades significativas de gas amoniaco; sin embargo, los suelos ácidos también pueden desprender este gas cuando se aplica en forma de urea o estiércol. El suelo y la temperatura afectan la tasa de hidrolisis de la urea y la de transferencia de amoniaco. Las emisiones más altas se producen en el momento de más alta temperatura diaria (Cameron et al., 2013).

La cantidad de amoniaco (NH_3) emitido desde el suelo está relacionada con la concentración de amonio (NH_4^+) en la solución del suelo. En general, cuanto mayor es la concentración de la solución de amonio más alta es la tasa potencial de emisión de NH_3 (Cameron et al., 2013).

Algunos suelos con reacciones de intercambio catiónico retienen iones de amonio, en la superficie de las arcillas y la materia orgánica a través de atracción electrstatica. Este mecanismo ayuda a almacenar el amonio en el suelo. El contenido de humedad del suelo afecta a la concentración de amoniaco (NH_3) y amonio (NH_4^+) en solución. Un bajo contenido de humedad del suelo promueve altas concentraciones de solución y por lo tanto la pérdida de amoniaco de alta emisión (Cameron et al., 2013).

4.3.3. Pérdidas de nitrógeno por desnitrificación

La desnitrificación es una reducción microbiológica a partir de los nitratos con pérdida final de N para el suelo y es afectada por factores tales como la humedad del suelo, la cantidad de N y carbono (C) disponibles en el suelo.

Cambios en el contenido de humedad del suelo influyen en la tasa de desnitrificación potencial. Existe más desnitrificación en suelos arcillosos que en arenosos debido a mayor presencia de actividad biológica de microorganismos tales como bacterias, las cuales ayudan a descomponer la materia orgánica y así iniciar el proceso. La disponibilidad de nitrato de amonio tiene influencia en la tasa de desnitrificación. Un aumento de nitrato de amonio generalmente resulta en una disponibilidad de N mineral. Por su parte, está comprobado que hay una fuerte relación entre el carbono orgánico y la desnitrificación. La adición de carbono orgánico favorece la población microbiana necesaria para el proceso de desnitrificación (Cameron et al., 2013)

Las pérdidas de nitrógeno no solo afectan el sistema suelo-planta, ni solo reducen la fertilidad del suelo y rendimiento de los cultivos, también puede crear daños muy severos al medio ambiente. Las emisiones de amoníaco a la atmósfera favorecen a la generación de la lluvia ácida y es una fuente indirecta de las emisiones de óxido nitroso (N_2O), contribuyendo al efecto invernadero. Pérdida por lixiviación en lagos y ríos pueden causar eutrofización que es el resultado de un crecimiento excesivo de vegetación acuática. La contaminación por nitratos en fuentes de agua frescas puede causar daño a la salud. Emisiones de óxido nitroso

(N₂O) a la atmosfera contribuyen al desgaste de la capa de ozono y también hacen aportaciones al cambio climático (Cameron et al., 2013).

4.4. *Uso de sensores ópticos (GreenSeeker®) y fases de implementación*

El uso de tecnología de sensores ópticos representa una alternativa sustentable que permite determinar la cantidad exacta de N que requiere el cultivo de trigo para poder lograr sus más altos rendimiento (Ortiz-Monasterio et al. 2013). En los lugares donde se ha implementado o se está en proceso de implementación, la tecnología de sensores ópticos (GreenSeeker®) se han desarrollado tres fases: Calibración, validación y transferencia de tecnología (Ortiz-Monasterio y Raun, 2007; Santillano et al., 2013).

4.4.1. Calibración

La calibración consiste en generar un algoritmo matemático que permite estimar con una certeza relativamente alta cuál es el rendimiento potencial del trigo, desde una etapa temprana en el ciclo de vida de la planta. Se ha encontrado que las etapas fenológicas que más se relacionan con el rendimiento potencial del trigo es en la finalización del amacollamiento a comienzo del encañe, en las etapas 2.3-3.1 en la escala de Zadoks (Zadoks et al., 1974).

4.4.2. Validación

La validación consiste en verificar si el algoritmo matemático que se desarrolla en la fase de calibración resulta efectivo en la recomendación de las dosis de fertilizante nitrogenado (N). Durante la validación los productores participan como productores cooperantes cediendo superficies de dos a tres hectáreas. En las superficies cedidas por los productores cooperantes, se aplica la dosis de nitrógeno (N) recomendada por la tecnología de sensores. A esta zona se le conoce como “área del sensor”. El resto de los lotes son fertilizados de acuerdo con las dosis tradicionales utilizadas por los productores. A esta zona se le conoce como “área del productor”. Para validar la efectividad de la tecnología, se comparan los rendimientos y las dosis de fertilizante empleadas en el área del sensor contra la franja rica y el área del productor. La tecnología habrá sido validada positivamente cuando los rendimientos en el área del sensor son igual o mayores que en la franja rica o el área del productor, si el productor utiliza dosis iguales o mayores a las aplicadas en la franja rica.

4.4.3. *Transferencia de tecnología*

La fase de transferencia de tecnología consiste en la fertilización de lotes completos, siguiendo la recomendación del sensor y el algoritmo. En este caso el productor y los técnicos que asesoran a los productores, ya confían plenamente en la tecnología de uso del sensor para fertilización de sus lotes completos. Estos trabajos se realizan en superficies máximas de 20 ha; el tamaño promedio de los lotes de los productores de la región.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Localización del área experimental

El valle de Mexicali, B.C., México, se localiza 32° 24' de latitud norte y 115° 11' de longitud oeste, a una altitud promedio de dos metros sobre nivel del mar, ubicado en la parte noreste de la península de Baja California. La región se caracteriza por tener un clima extremo durante la mayor parte del año. En época de verano de las más calurosas en todo el mundo (para zonas habitadas) se presenta desde mayo hasta mes de octubre, en general el clima tiene oscilaciones térmicas diurnas y estacionales muy marcadas. La precipitación media anual es de alrededor de 60 mm y los vientos en el verano son en dirección sur – sureste y en el resto del año son nor-noreste. Durante 1994 las temperaturas oscilaron entre los 24°C y los 46°C siendo la temperatura máxima promedio para este intervalo de 39 °C y la máxima extrema de 49°C. (Ramírez et al., 2006).

En los ciclos de otoño invierno 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013 y 2013-2014, se llevaron a cabo experimentos de calibración en campos de productores cooperantes localizados en el valle de Mexicali y en el campo agrícola experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California (ICA-UABC). En 2010-2011 se establecieron dos experimentos en ICA-UABC y seis en campos productores cooperantes. En 2011-2012 se establecieron tres experimentos en el ICA-UABC y tres en campos de productores.

En los ciclos 2012-2013 y 2013-2014 se establecieron experimentos de calibración solamente en el ICA-UABC.

5.2. Manejo Agronómico

El manejo agronómico en los diferentes experimentos que se establecieron para la calibración fue variable, ya que estuvo sujeto al manejo tradicional por los productores. En el ICA-UABC la fertilización con fósforo estuvo en el rango de 60-80 kg de P₂O, las fechas de siembra, riegos, fertilizaciones, preparación del suelo, plagas y enfermedades, se realizaron conforme a las recomendaciones del INIFAP (1999), durante los tres ciclos del establecimiento de experimentos de calibración. Las variedades de trigo utilizadas a lo largo del proceso de calibración han incluido variedades del grupo 1 (para elaboración de pan) y del grupo 5 (para elaboración de pastas). Entre las variedades empleadas en experimentos con productores cooperantes y en el ICA-UABC, se han utilizado las siguientes variedades: Rayón, Rio Colorado, Cerro Prieto, Yécora F-70, Rafi y Samayoa.

5.3. *La franja rica y su función*

En las fases de validación y en transferencia de tecnología es preciso establecer una “franja rica”. La franja rica consiste en una franja de un ancho mínimo de 6 metros a lo largo de toda la parcela, con una dosis de nitrógeno no limitante para que el cultivo exprese su potencial máximo. Es el punto de referencia para el diagnóstico y debe ser colocada al inicio del ciclo de cultivo, en Mexicali, en el primer riego de auxilio (o riego de asiento) en una área representativa de la parcela. Entre la franja rica y el resto del lote sólo debe existir diferencia en la fertilización nitrogenada. Todos los demás factores como fecha y densidad de siembra, aplicaciones de herbicidas y plaguicidas, variedad, fósforo u otros nutrientes deben ser manejados igual en estas dos áreas.

5.4. Variables de interés y forma de medirlas

En el ciclo de siembra 2009-2010 se realizaron mediciones del índice de diferencia normalizado de la vegetación (NDVI, normalized difference vegetation index, por sus siglas en inglés), utilizando el sensor óptico (GreenSeeker®, NTech Industries Incorporation, Ukiah, CA, EUA). La medición se realizó a partir de 50 días transcurridos entre la fecha del riego de germinación y la fecha de medición. La etapa fenológica al momento de la medición fue a finales de amacollamiento a inicio de encañe, con uno a dos nudos visibles por encima de suelo en la etapa Z30-Z32 en la escala de Zadoks (Zadoks et al., 1974). Cuando el cultivo alcanzó madurez fisiológica, se cosecharon dos sub-muestras al azar de 0.1 m² de cada parcela para estimar el rendimiento de grano. La cosecha se hizo manualmente, cortando el trigo con hoces, depositándolo en costales de rafia, trillado con una maquina trilladora estacionaria de manojos, cribada y pesada.

En contraste con el tamaño de la muestra para estimar el rendimiento en 2009-2010 (0.1 m²), las mediciones de NDVI con el sensor abarcaron una superficie de 6 m² centrales de las parcelas (de 12 m²). En los ciclos agrícolas 2010-2011 y 2011-2012, se realizaron mediciones con el sensor a partir de 60 días transcurridos entre la fecha del riego de germinación y la fecha de la medición de NDVI; los trigos se encontraban en la etapa de encañe, con dos o tres nudos visibles por encima del suelo Z32-Z33. En la escala de (Zadoks et al., 1974), En estos dos últimos ciclos se cosecharon 4 m² de las parcelas; es decir, se procuró obtener muestras del rendimiento en un tamaño de superficie comparable al área

donde se realizaron las mediciones de NDVI con el sensor, a diferencia de como se había procedido en el ciclo agrícola 2009-2010.

En todos los ciclos de experimentos de calibración se utilizaron los datos de NDVI y se procedió a normalizarlos mediante la división del NDVI entre el número de días transcurridos entre la fecha del riego de germinación y la fecha de medición con el sensor. De esta manera se obtuvo las estimaciones del rendimiento al comienzo de las etapas de encañe (INSEY, in-season estimation of yield, por sus siglas en inglés). Con los datos de INSEY (en el eje de las abscisas x) y los datos de rendimiento de grano observados (en el eje de las ordenadas y), se obtuvo un gráfico y se corrió una regresión simple. De esta regresión se derivó una ecuación de predicción que permitió estimar los rendimientos de trigo desde el comienzo del encañe, como realizado por Lukina et al. (2001); Raun et al. (2001) y Raun et al. (2005). En todos los ciclos se utilizó Microsoft Excel (Microsoft Corporation) para la generación de los gráficos, para la obtención de las ecuaciones de predicción y el valor de las R^2 .

5.5. *Diseño experimental*

En 2009-2010 se establecieron experimentos con 24 parcelas de 12 m² (2 x 6 m). Se aplicaron ocho tratamientos de fertilizante nitrogenado (N) en dosis de 0, 60, 120, 180, 240, 300, 360 y 420 kg N ha⁻¹, replicados tres veces, distribuidos al azar en cada repetición. Los tratamientos de fertilizante N en los tres ciclos siguientes fueron los mismos y fueron aplicados al momento de la siembra o con el primer riego de auxilio en planta. El diseño experimental fue el de bloques completos al azar. A partir del ciclo agrícola 2010-2011 hasta el 2013-2014 las parcelas tuvieron un área de 6m² (2 x 3 m), en tanto para los experimentos en el el ICA-UABC, como para los establecidos en campo de productores.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el ciclo agrícola 2009-2010, se obtuvo una distribución aleatoria entre INSEY y los rendimientos observados de grano (Figura 1). Al no existir una tendencia lógica entre las dos variables, no fue posible contribuir a la generación de una ecuación de predicción al final de este ciclo agrícola. La nula relación entre el INSEY y los rendimientos de grano en este ciclo agrícola se debió, probablemente, a la diferencia de tamaño de parcela (muestra) entre el área diagnosticada con el sensor y el área cosechada. Raun *et al.* (2001) cosecharon los mismos 4 m² del área que había sido utilizada para obtener los datos de NDVI.

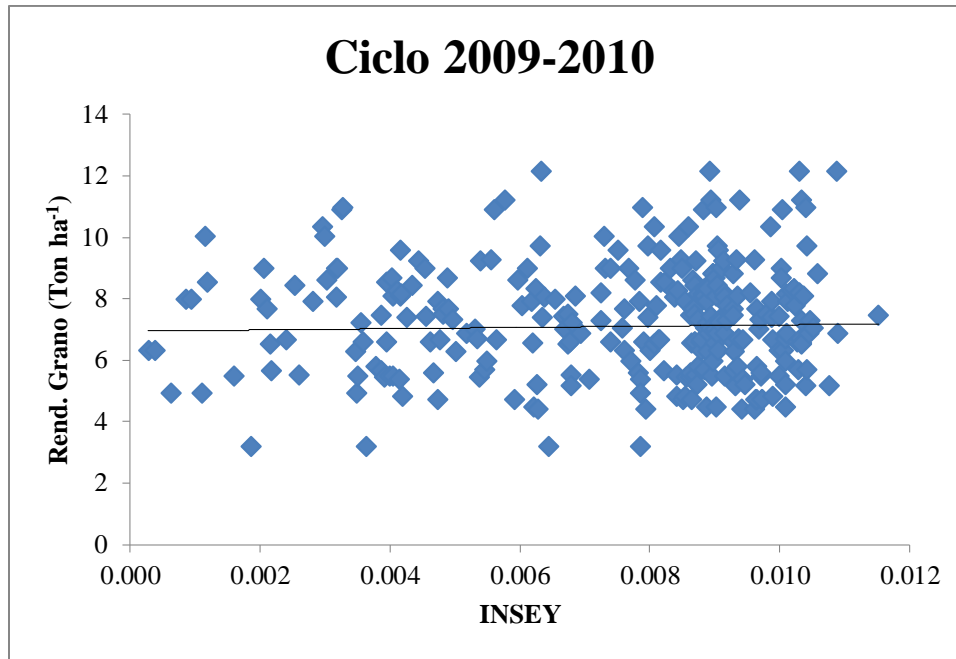


Figura 1. Relación entre el rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali en el ciclo agrícola 2009-2010.

Para el ciclo 2010-2011, sin embargo, se observó una tendencia exponencial (Figura 2), similar a la observada por otros investigadores, al realizar experimentos de calibración (Raun et al. 2001; Lukina et al. 2001; Li et al. 2009; Singh et al. 2011). Esta relación entre los rendimientos observados y los predichos pudo deberse a una mayor congruencia entre el tamaño del área diagnosticada con el sensor y el área cosechada. La primera versión de la ecuación de predicción del rendimiento fue $\text{Rendimiento Estimado} = 0.67e^{168.31(\text{INSEY})}$, con una $R^2 = 0.72$.

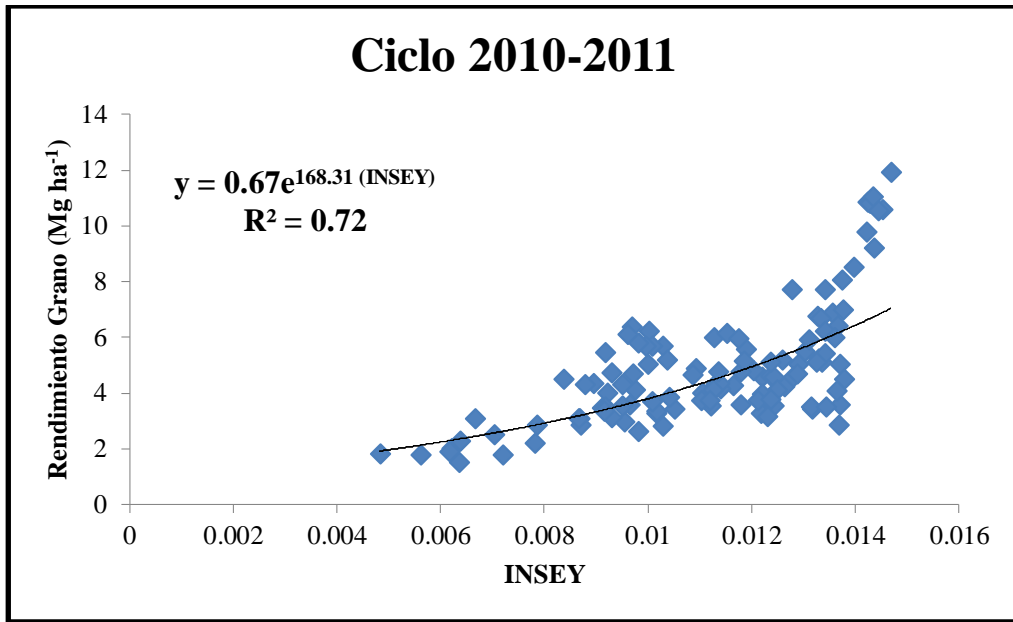


Figura 2. Relación entre el rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali en el ciclo agrícola 2010-2011.

Los rendimientos predichos de cuatro de los cinco experimentos usados para desarrollar la ecuación de predicción para el Valle de Mexicali en 2010-2011, cayeron en $\pm 19\%$ de los promedios de rendimiento medidos, con coeficientes de determinación R^2 de 0.77 a 0.90 (Cuadro 1). El experimento identificado como *Ing. Licón A*, en el Cuadro 1, tuvo un desempeño pobre en términos de predicción de los rendimientos, sobrestimando en un 32% a los rendimientos medidos. Este experimento se encontraba completamente acamado al momento de su cosecha y el corte de las parcelas fue complicado. En este caso, es posible que los rendimientos predichos y medidos, si no hubiera habido complicaciones en la cosecha, podrían haber estado mejor relacionados. Raun *et al.* (2001), reportaron una diferencia de ± 14 entre los rendimientos medidos y los predichos, en seis de nueve experimentos de calibración.

Cuadro 1. Rendimiento medido, predicho mediante un algoritmo, porcentaje del rendimiento medido y coeficiente de determinación (r^2) de cinco experimentos de calibración en el valle de Mexicali, B.C., México, en el ciclo 2010-2011.

Experimento	<i>n</i>	Rendimiento medido	Rendimiento predicho	Porcentaje del rendimiento medido	r^2
		(Mg ha ⁻¹)			
ICA-A	24	3.9	3.9	100	0.77
ICA-B	24	3.5	4.2	118	0.82
Palmerín A	24	4.3	3.1	73	0.80
Palmerín B	24	7.5	6.1	81	0.90
Ing. Licón A	24	4.6	6.0	132	0.17

Li *et al.* (2009), reportaron una relación exponencial significativa entre el INSEY y los rendimientos observados en seis experimentos conducidos en 2005, con $R^2 = 0.63$ y $R^2 = 0.45$ en 10 experimentos conducidos de 2005 a 2007. Ellos concluyeron que el INSEY puede predecir los rendimientos potenciales de trigos invernales en las Planicies del Norte de China y, consecuentemente estimar adecuadamente las dosis complementarias de fertilizante. En India, Singh *et al.* (2011), reportaron tendencias exponenciales significativas entre INSEY y los rendimientos medidos con $R^2 = 0.90$, 0.66 y 0.61 en uno, dos y tres años de pruebas, respectivamente, cuando las mediciones con el sensor se hicieron en la etapa de Feekes 5-6 (Large, 1954) (equivalente a Z30-Z31, en la escala de Zadoks); y $R^2 = 0.84$, 0.83 y 0.76 en uno, dos y tres años de experimentos de calibración, respectivamente, en las mismas tres localidades, cuando las mediciones con el sensor se hicieron en la etapa de Feekes 7-8 (equivalente a Z32-Z37, en la escala de Zadoks). El estudio concluyó que para las Planicies del Indo-Ganges del sur de Asia, el INSEY es un predictor confiable de los rendimientos de trigo.

En 2011-2012, se mantuvo una tendencia exponencial entre las variables (Figura 3). Esta segunda ecuación de predicción del rendimiento de trigos en Mexicali, fue $\text{Rendimiento Estimado} = 0.85e^{153.79 (\text{INSEY})}$, con una $R^2 = 0.68$. Esta ecuación de regresión se obtuvo a partir de seis ambientes repartidos en dos ciclos, cuatro en 2010-2011 y dos en 2011-2012.

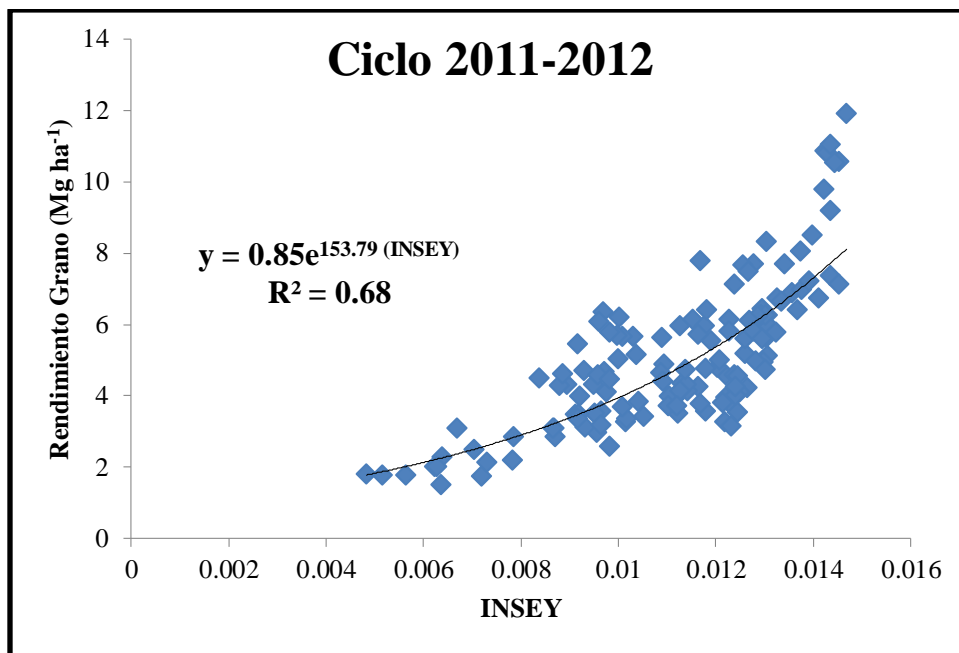


Figura 3. Relación entre rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali en el ciclo agrícola 2010-2011 y 2011-2012.

Para el ciclo 2012-2013 se obtuvo una tendencia exponencial, parecida a la citada por otros autores, con un alto grado de confiabilidad. Generando Rendimiento Estimado = $1.09e^{134.70 (INSEY)}$, con una $R^2 = 0.82$ (Figura 4).

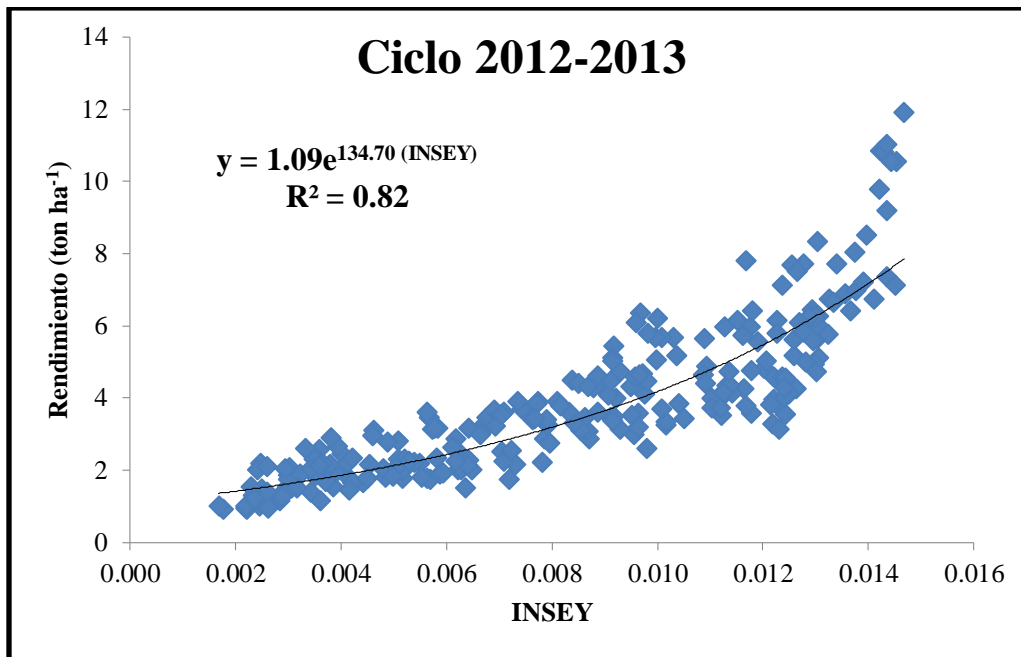


Figura 4. Relación entre rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali en el ciclo agrícola 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013.

Para el ciclo 2013-2014 se obtuvo una tendencia similar a la del ciclo anterior, con puntos muy unidos, generando confiabilidad en los datos. La ecuación al final de este ciclo fue Rendimiento Estimado = $1.08e^{135.13 (INSEY)}$ con una $R^2 = 0.81$ (Figura 5).

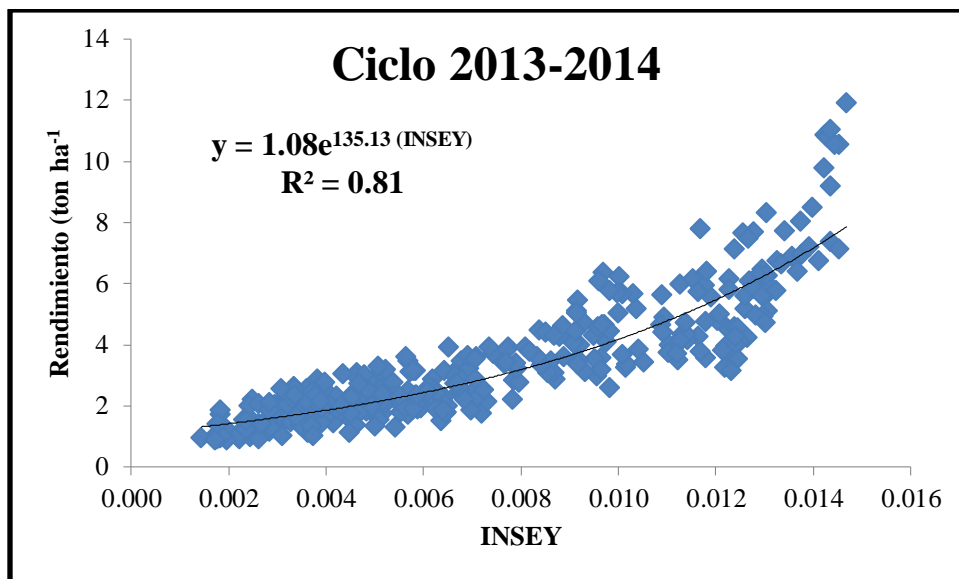


Figura 5. Relación entre rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali en el ciclo agrícola 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 y 2013-2014.

VII. CONCLUSIONES

Después de haber generado una ecuación de predicción del rendimiento específica para la región, relacionado el INSEY con los rendimientos medidos, fue posible obtener un modelo de predicción.

Esta ecuación es uno de los componentes centrales de un algoritmo que permite realizar recomendaciones de fertilizantes, en base a potencial de rendimiento del cultivo.

Es posible obtener recomendaciones de fertilizante en base a esta tecnología en línea. El algoritmo bajo el nombre “Trigo Baja California UABC-CIMMYT-México” se encuentra en el sitio: <http://www.nue.okstate.edu/SBNRC/mesonet.php>.

Utilizando este algoritmo se ha podido documentar ahorros de aproximadamente 70 kg de N ha⁻¹, sin una reducción de los rendimientos.

Esta cifra representa un ahorro sustancial en los costos de producción del cultivo de trigo y una contribución considerable para el incremento de la rentabilidad de la actividad y para reducir el impacto ambiental.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bautista, P.R.J., Pérez, H.P., Villasellor, M.E. 2006. Calidad de la cosecha de trigo en México: ciclo otoño-invierno 2005-2006. CIMMYT, CONASIT, GRANOTECMEXICO, SIAP, SAGARPA, INIFAP, Impreso en México.
- Buckman, O.H., Brady, C.N. 1977. Naturaleza y propiedades de los suelos. Reimpresión 1977. Impreso en España, Editorial MONTAINER Y SIMON, S.A. pag 426-427
- FAO. 2004. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Perspectivas a plazo medio de los productos básicos agrícolas. Proyecciones al año 2010, Roma, Italia.
- Flores-Casas Raquel. 2011. El suelo cultivo y las condiciones climáticas. Edición paraninfo, S.A. España.
- FND. Financiera Nacional Desarrollo. SAGARPA. SHCP. Mayo 2014.
- Fundación Produce Baja California, Agenda de Innovación Tecnológica 2012-2013. Fundación Produce de Baja California 2012-2013.
- García, N.G., García, N.S. 2013. Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas. 3 edición, Mundi-prensa, Madrid España.
- INIFAP. 2010. Guía técnica para el área de influencia del Campo Experimental Valle de Mexicali, guía técnica No 1 ISBN 978-607-425-432-7.
- K.C. Cameron, H.J. Di and J.L. Moir. 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system. Annals of applied biology ISSN 0003-4746. Centre soil and environmental Research, Lincoln University, Canterbury, New Zealand

- Li, F., Y. Miao, F. Zhang, Z. Cui, R. Li, X. Chen, H. Zhang, J. Schroder, W. R. Raun, and L. Jia. 2009. In-Season Optical Sensing Improves Nitrogen-Use Efficiency for Winter Wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73(5):1566-1574.
- Lukina, E.V., W. Freeman, K.J. Wynn, Thomason, R.W. Mullen, M.L. Stone, J.B. Solie, A.R. Klatt, G.V. Johnson, R.L. Elliot, and W.R. Raun. 2001. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. *J. Plant Nutr.* 24:855-898.
- Porras, C.J. 1980. Resumen general de los principales aspectos agronómicos de los diferentes granos en Colombia. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas-OEA-Representación en Colombia Pág. 20-21.
- Ramírez, H. J., Román, J. C., Alonso, R. L. J., Lázaro, M. O., Quintero, N. M., Estela, A. V. S., Iván, A. M. E., Socorro, R. H. M., Ojeda, B. S., Armijo, V. C., Elizabeth, R. B. M., Velázquez, L. N. 2006. Problemática ambiental de Mexicali y su Valle. Universidad Autónoma de Baja California.
- Raun, W.R., J.B. Solie, G.V. Johnson, M.L. Stone, E.V. Lukina, W.E. Thomason, and J.S. Schepers. 2001. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agron. J.* 93:131-138.
- Raun, W.R., J.B. Solie, M.L. Stone, K.L. Martin, K.W. Freeman, R.W. Mullen, H. Zhang, J.S. Schepers, and G.V. Johnson. 2005. Optical Sensor Based Algorithm for Crop Nitrogen Fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36:2759-2781.

- S.R. Simmons, E.A Aoelke and P.M. Anderson, Growth and development guide for spring wheat Simmons for spring wheat. 1985. University of Minnesota Agricultural Extension Folder AG-FO-2547
- Salas, S.J., García, L.P., Ripolles, S.M.J. 2005. La alimentación y la nutrición a través de la historia. Editorial Glosa, Barcelona.
- Sánchez - Munguía Alberto. 2002. Geografía agrícola de Baja California. Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, Baja California.
- Santillano-Cázares Jesús, Ángel López López, Iván Ortiz-Monasterio y W.Raun. 2013. Uso de sensores ópticos para la fertilización de trigo (*Triticum aestivum* L.). Terra Latin-American Volumen 31, Numero 2.
- SIAP. 2013. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>
- Singh B., R. K. Sharma, J. Kaur, M. L. Jat, K. L. Martin, Y. Singh, V. Singh, P. Chandna, O. P. Choudhary, R. K. Gupta, H. S. Thind, J. Singh, H. S. Uppal, H. S. Khurana, A. Kumar, R. K. Uppal, M. Vashistha, W. R. Raun, and R. Gupta. 2011. Assessment of the nitrogen management strategy using an optical sensor for irrigated wheat. Agronomy for Sustainable Development Volume 31, Issue 3, pp 589-603.
- Zadoks, J.C., T.T. Chang and C.F. Konzak, 1974. A decimal code for growth stages of cereals. Weed Res., 14: 415-421.