



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Servicio Nacional de  
Meteorología e Hidrología  
del Perú - SENAMHI

# CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO CERES MAIZE-DSSAT EN LA COSTA CENTRAL

2015



Organización  
Meteorológica Mundial





Ing. Amelia Díaz Pabló  
Presidenta Ejecutiva del SENAMHI

Ing. Ezequiel Villegas Paredes  
Director Científico del SENAMHI

Ing. Mg. Irene Trebejo Varillas  
Director General de Agrometeorología

Geo. Nelly Aurora Pérez Díaz  
Director de Agrometeorología Operativa

**Autores:**

Ing. Wilfredo Yzarra Tito  
Especialista en Agrometeorología  
Dirección de Agrometeorología Operativa - SENAMHI

Bach. Marite Lizbeth Navarro Bejarano  
Especialista en Agronomía  
Dirección de Agrometeorología Operativa - SENAMHI

**Colaboradores:**

Ing. Julián Chura Chuquija  
Docente Principal del Departamento de Fitotecnia  
Facultad de Agronomía - Universidad Nacional Agraria La Molina

Ing. Lorenzo Miguel Hurtado Leo  
Docente Principal del Departamento Académico de Suelos  
Facultad de Agronomía - Universidad Nacional Agraria La Molina

Miguel Angel Salazar Silva  
Alumno de la Facultad de Agronomía

# Índice

<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>II. Objetivos</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos específicos	3
<b>III. Revisión Bibliográfica</b>	<b>3</b>
3.1 Modelos de simulación de cultivos	3
3.2 Clasificación de los modelos de simulación de cultivos	5
3.3 Modelo CERES-Maize	7
3.3.1 Principios básicos de la simulación de cultivos con el modelo CERES-Maize	9
3.3.2 Desarrollo de la planta	11
3.3.3 Influencia de la temperatura en el desarrollo	13
3.4 Calibración y validación de los modelos de simulación de cultivos	14
<b>IV. Materiales y Métodos</b>	<b>15</b>
4.1 Ubicación del campo experimental	15
4.2 Descripción de los híbridos de maíz amarillo duro	16
4.2.1 Híbrido de maíz amarillo duro PM 213	16
4.2.2 Híbrido de maíz amarillo duro Experimental 5	16
4.2.3 Híbrido de maíz amarillo duro Inti 8420	16
4.3 Información edáfica	17
4.4 Diseño experimental	20
4.4.1 Ensayo bajo riego por gravedad	20
4.4.2 Ensayo bajo riego por goteo	20
4.5 Distribución de las parcelas experimentales	21
4.5.1 Ensayo bajo riego por gravedad	21
4.5.2 Ensayo bajo riego por goteo	22
4.6 Conducción del ensayo experimental	24
4.6.1 Ensayo bajo riego por gravedad	24
4.6.2 Ensayo bajo riego por goteo	24

4.7	Evaluación fenológica y biométrica	25
4.7.1.	Evaluaciones fenológicas	25
4.7.2	Evaluaciones biométricas	27
4.8	Calibración del modelo CERES Maize	31
4.8.1	Proceso de calibración	32
4.9	Validación del modelo CERES Maize	34
<b>V.</b>	<b>Resultados y discusión</b>	<b>35</b>
5.1	Calibración del modelo CERES Maize	35
5.2	Validación del modelo CERES Maize	42
5.2.1	Días a la emergencia	42
5.2.2	Días a la floración masculina	44
5.2.3	Número final de hojas	45
5.2.4	Máximo índice de área foliar	46
5.2.5	Peso seco de la parte aérea a la maduración fisiológica	47
5.2.6	Número de granos por planta	49
5.2.7	Peso seco de grano	50
5.2.8	Porcentaje de nitrógeno en el grano	51
5.2.9	Rendimiento	51
5.2.10	Índice de área foliar	53
5.2.11	Materia seca de la parte aérea de la planta	58
<b>VI.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>62</b>
<b>VII.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>63</b>
<b>VIII.</b>	<b>Referencia bibliográfica</b>	<b>64</b>
<b>IX.</b>	<b>Anexos</b>	<b>69</b>

## **I. Introducción**

El maíz amarillo duro es el tercer cultivo de importancia a nivel nacional y constituye uno de los principales enlaces de la cadena agroalimentaria del país, la cual se inicia con su cultivo y termina en las cadenas e industrias de carne de aves y cerdos respectivamente.

En la costa peruana, las condiciones de cultivo son raramente encontradas en otras partes del mundo pues el clima subtropical de la zona permite que se pueda sembrar maíz todo el año; sin embargo, ello no significa que se pueda sembrar la misma variedad o híbrido en diferentes épocas con iguales resultados, ya que el rendimiento del cultivo de maíz depende de la relación de dos factores esenciales. El primer factor es la naturaleza genética, representado por la semilla; y el segundo corresponde al ambiente donde se desarrolla, incluyendo tanto el clima como el manejo agronómico.

Durante el año 2013 Perú produjo 997 298 toneladas de maíz amarillo duro, cosechado en 225 130 hectáreas. El 76% de la producción nacional de maíz amarillo se concentró en Piura (3,8%), Lambayeque (8,5%), La Libertad (16,9%), Ancash (4,8%), Lima (21%), Ica (9,5%) y San Martín (11,5%). El rendimiento promedio nacional llegó a 4,5 t/ha, aunque en algunas regiones se registraron niveles significativamente más altos que demuestran su alta competitividad en términos agronómicos: Lima (9,6 t/ha), Ica (9,3 t/ha), La Libertad (8,6 t/ha), Lambayeque (6,2 t/ha), Ancash (5,1 t/ha), Piura (3,6 t/ha) y San Martín (2,2 t/ha). A pesar de estas cifras, el estancamiento de la producción nacional en los últimos seis años ha sido acompañado de un incremento sostenido de las importaciones de maíz amarillo. Desde 1991 el volumen de producción no abastece la demanda interna. En 2013 se han importado 2 005 436 toneladas a un precio FOB de 486 775 miles de dólares (US\$) para cubrir la demanda, siendo la producción nacional sólo el 49,7% de la demanda nacional (SIEA-2014). Esta baja producción puede ser atribuida al inadecuado manejo del sistema de producción y al desconocimiento de la influencia del clima en la producción y productividad del cultivo.

Bajo estas circunstancias la investigación en este cultivo es primordial, pero los recursos económicos y humanos necesarios para llevarla a efecto son cada vez más escasos. Sin embargo, en la actualidad surgen como una alternativa de la producción constante de tecnología, los denominados modelos de simulación, los cuales tratan de simular los procesos biológicos del cultivo e intentan predecir el comportamiento de las plantas, simulando los procesos fisiológicos que ocurren en las mismas, considerando la interacción entre los diferentes órganos que las conforman y su respuesta al ambiente. Los modelos predicen el momento de ocurrencia de los estados fenológicos, la evolución de la producción de materia seca por cada fracción de la planta y el rendimiento en función de variables de suelo, clima, manejo y del híbrido o la variedad empleada. Permiten definir estrategias de producción en la etapa de planificación de un cultivo futuro o bien ayudar a tomar decisiones tácticas durante el ciclo del cultivo (Ritchie, 1990).

Por lo tanto, mediante el uso de los modelos de simulación es posible caracterizar agroclimáticamente nuestras áreas agrícolas para una adecuada planificación de la producción de maíz, de manera que cuantifiquemos el grado de incidencia de los factores climáticos que afectan el crecimiento y desarrollo del cultivo y contemos con elementos de juicio para predecir situaciones de riesgo y optimizar nuestros recursos climáticos. Esto se puede realizar utilizando el modelo CERES-Maize del paquete de simulación DSSAT v. 4,5. La validación del modelo se realiza mediante la comparación de los datos observados y los predichos por el modelo, para lo cual se utilizó información obtenida de ensayos experimentales correspondientes a la campaña agrícola 2014-2015 y ubicados en la Universidad Nacional Agraria La Molina.

## **II. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Calibrar y validar el modelo de simulación de cultivo CERES-Maize de DSSAT, en condiciones de la costa central del Perú.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Obtener los coeficientes genéticos de los híbridos de maíz amarillo duro sembrados, bajo condiciones de parcelas experimentales de la Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Validar el modelo de simulación de cultivos CERES-Maize, bajo condiciones de clima y suelo de las parcelas experimentales de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

## **III. Revisión bibliográfica**

### **3.1 Modelos de simulación de cultivos**

Las interacciones entre los cultivos y su ambiente integran procesos físicos, químicos y biológicos, cuyo estudio y comprensión son extremadamente complejos. Los sistemas biológicos objeto de estudio de la agronomía son sistemas jerárquicos, caracterizados por sus múltiples niveles de organización (Thornley y Jonson, 1990).

El aumento de la demanda de productos agrícolas y la mayor presión ejercida sobre la tierra, agua y otros recursos naturales han provocado un incremento en la demanda de información necesaria para la toma de decisiones en la agricultura; además, la generación de nuevos datos por medio de los métodos agronómicos tradicionales y su posterior publicación, no son suficientes para cubrir las nuevas necesidades ya que la experimentación agronómica tradicional se lleva a cabo en un punto particular del tiempo y el espacio, con resultados de un sitio y estación específicos, con alta demanda de tiempo, esfuerzo y medios económicos. Así, en la actualidad se busca una productividad cada vez mayor

de los cultivos agrícolas comerciales, pero al mismo tiempo se busca también la sustentabilidad de los sistemas de producción agrícola. Los modelos de simulación de crecimiento de cultivos constituyen una de las herramientas utilizadas más importantes, en busca del entendimiento de los diversos procesos comprendidos en dichos sistemas y sus interrelaciones (Jones, *et al.*, 2003).

Los modelos de simulación de cultivos tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con investigación, manejo de cultivos y planificación. Pueden ayudar a la comprensión de las interacciones genético-fisiológico-ambientales, con una integración interdisciplinaria. Permiten definir estrategias de producción en la etapa de planificación de un cultivo futuro o bien ayudar a tomar decisiones tácticas durante el ciclo del cultivo tales como: prácticas culturales, fertilización, irrigación y uso de pesticidas. Como herramienta de planificación permiten cuantificar a través de la predicción, el impacto de los procesos de erosión, contaminación por agroquímicos, distintas estrategias ante el cambio climático y el pronóstico de rendimiento a nivel regional (Boote *et al.*, 1996).

Los modelos de cultivo son útiles para optimizar prácticas de manejo tales como época de siembra, espaciamiento, uso del agua y planificación de riego. Modificando la escala de espacio y tiempo, los modelos nos permiten abordar fenómenos climáticos como el ENSO (El Niño Oscilación Sur) analizando en forma interactiva el impacto de la variabilidad climática y las decisiones de manejo sobre la productividad de los cultivos, resultado difícil de obtener a partir de análisis estadísticos clásicos o experimentos agronómicos tradicionales (Royce *et al.*, 2001).

Por otra parte estos modelos tienen una gran potencialidad como herramienta para evaluar factores genéticos que determinan la acumulación y ubicación de la materia seca producida para distintos ambientes y para diferentes prácticas de manejo, permitiendo entonces evaluar características genéticas para incrementar el rendimiento potencial mediante, por ejemplo, una mejora en: fotosíntesis, reparto de asimilados, translocación desde las partes vegetativas y

mayor duración del período de llenado de grano (Boote y Tollenaar, 1994; Jones *et al.*, 2003).

### **3.2 Clasificación de los modelos de simulación de cultivos**

Los primeros modelos de cultivo se enfocaron hacia la producción potencial, sin considerar limitaciones de agua, nutrientes, plagas, enfermedades ni malas hierbas, ya que en principio es la situación más sencilla de modelizar. En las últimas décadas se ha producido un importante avance, tanto desde el punto de vista de la mejora y disponibilidad de los equipos informáticos, como de la comprensión de los procesos fisiológicos de los cultivos lo que ha permitido obtener una mejor descripción de los mecanismos de crecimiento y la posterior evaluación de los modelos de crecimiento disponibles (Boote *et al.*, 1998).

Un avance importante para el estudio de la relación entre el cultivo y las variables ambientales fue la introducción de modelos mecanicistas de simulación de crecimiento de los cultivos (Wit *et al.*, 1965, Duncan *et al.*, 1967). Estos modelos, de los más simples a los más complejos, buscan explicar, apoyándose en la fisiología de cultivos, el sistema que se pretende modelizar; de esta forma, sus parámetros deben tratar de tener un significado fisiológico y permitir estimar el incremento de biomasa diario así como su reparto entre los diferentes órganos de la planta.

Thornley *et al.* (1990) definen los modelos mecanicistas como aquellos empleados para comprender el funcionamiento de un sistema en términos de los mecanismos que actúan sobre él. Pueden ser construidos dividiendo el sistema y tratando de comprender su comportamiento de acuerdo con la evolución de sus componentes y de sus interacciones. Estos modelos suelen contener un número elevado de ecuaciones y parámetros, presentando la desventaja de ser generalmente muy complejos y precisar, en consecuencia de numerosas estimaciones. Para estos mismos autores, los modelos empíricos son aquellos construidos a partir de observaciones de un sistema real, obteniendo una ecuación o un grupo de ecuaciones que representan los datos experimentales

ya que en muchas ocasiones se trata de la única solución disponible para resolver un problema. Estos modelos son más fáciles de construir que los modelos mecanicistas pero tienen la desventaja de no representar los principales procesos subyacentes que tienen lugar en el interior del sistema, y de utilizar parámetros frecuentemente sin significado biológico. Además, estos modelos presentan una gran dependencia respecto de las condiciones del medio en el que han sido desarrolladas sus ecuaciones empíricas.

Los modelos de simulación disponibles en la actualidad abarcan prácticamente todos los cultivos herbáceos con cierto interés económico. Gran número de ellos han revelado ser de gran utilidad en programas de investigación. De cara al futuro se prevé que los modelos jueguen un papel cada vez más importante en la agricultura comercial (especialmente en la denominada agricultura de precisión) en aspectos como la planificación y optimización de rendimientos y recursos, no sólo desde el punto de vista productivo o económico, sino también de la sostenibilidad de las producciones y el mantenimiento de los equilibrios ambientales (Jacobson et al., 1995).

En términos generales, los modelos de análisis de cultivo-clima han sido diseñados, en primer lugar, para analizar los efectos diarios de la interacción de cualquiera de las tres variables ambientales (temperatura máxima, mínima y precipitación) en la respuesta de un cultivo anual reflejada en el rendimiento estacional o en los componentes del rendimiento. La respuesta del cultivo a cada una de estas variables es lineal (positiva o negativa) o cuadrática (cóncava hacia arriba o hacia abajo). La respuesta cambia cuantitativamente durante el ciclo de vida de un cultivo anual o como una función del tiempo biometeorológico (Hume et al. 1990).

En la actualidad existen varios modelos de simulación de cultivo y suelo disponibles para simular el crecimiento y manejo de maíz, tales como *Agricultural Production systems Simulator* (APSIM) (Keating et al; 2003), *Cropping Systems Simulator* (CropSyst) (Stöckle et al; 2003), *Erosion-Productivity Impact Calculator* (EPIC) (Jones et al; 1991; Williams, 1995) y *Decision Support System for*

*Agrotechnology Transfer* (DSSAT) en el que el modelo CERES-maize es uno de los módulos del paquete *DSSAT Cropping System Model* (CSM) (Jones *et al.*; 2003).

### **3.3 Modelo CERES-Maize**

El objetivo de los modelos de simulación de cultivo *Crop Environmental Resource Syntesis* (CERES) es predecir el promedio de las tasas de crecimiento, la duración del mismo y la cantidad de asimilados dirigidos al producto económico de la planta (Ritchie *et al.* 1998).

En general, los modelos de simulación CERES están conducidos por la acumulación de unidades de calor, o tiempo térmico, que a su vez determinan la duración y distribución de las fases fenológicas. Los modelos CERES existentes predicen confiablemente los efectos de temperatura y fotoperiodo en el desarrollo y rendimiento del cultivo (Wilkins y Singh, 2001).

Los cereales incluidos en los modelos del paquete *Decision Support System for Agrotechnology Transfer-Cropping system model* (DSSAT) son maíz, trigo, cebada sorgo, mijo y arroz. Una característica de cada modelo es su capacidad de incluir información específica del cultivar, que hace posible la predicción de variaciones en la ontogenia y características del componente rendimiento debidas al este, y sus interacciones con el ambiente. Los modelos CERES han sido probados en un amplio rango de ambientes. A pesar de que se puede hacer mejoras en los procedimientos de simulación, los resultados han mostrado que cuando la información de clima, cultivar y manejo agronómico es cuantificada razonablemente, los resultados de rendimiento están en límites aceptables de  $\pm 5$  a 15% de los rendimientos medidos (Ritchie *et al.* 1998).

Entre los modelos de cultivo que están incorporados al DSSAT se encuentra el CERES-Maize. Este es un modelo de simulación multipropósito que puede ser usado para la toma de decisiones de manejo agronómico dentro de la campaña agrícola, planeamiento estratégico y análisis del riesgo multianual, previsión del rendimiento para áreas grandes, definición de necesidades de investigación, etc. Estos propósitos requieren que el modelo tenga las siguientes características:

usar fácilmente inputs disponibles de clima, suelo y genética; estar escrito en un lenguaje familiar y ampliamente usado; requerir mínimo tiempo de cálculo y estar adaptado para usarse tanto en ordenadores centrales como en microcomputadoras (Jones, 1986).

CERES-Maize es un modelo dinámico de amplia utilización en todo el mundo, con algunas partes mecanicistas y otras empíricas, que simula el desarrollo, crecimiento y rendimiento del maíz. Desde la primera versión de este modelo (Jones y Kiniry, 1986), ha pasado por múltiples procesos de modificaciones realizados por diferentes grupos de investigación que se han ido incorporando en las sucesivas versiones del DSSAT (Boote *et al.*, 1996; Kiniry *et al.*, 1997; Kiniry y Bockholt, 1998; Jones *et al.*, 2003).

El modelo CERES-Maize calcula cada día el avance de la fenología, la tasa de crecimiento y el reparto de la biomasa entre los órganos en fase de crecimiento. Cuando el agua y el nitrógeno no limitan el crecimiento, los procesos simulados se ven afectados por las principales variables ambientales (radiación solar diaria y temperatura máxima y mínima diaria), los factores específicos del cultivar empleado (coeficientes genéticos) y las prácticas de cultivo (fecha de siembra, densidad de plantas, distancia entre líneas, etc.).

Este modelo de cultivo, como todos los incluidos en el software del DSSAT, (Jones *et al.*; 2003), permite también simular el desarrollo y crecimiento del cultivo en entornos donde el agua y el nitrógeno son limitantes, cuando las opciones de balance de agua y nitrógeno están activadas. En estas circunstancias, el modelo realiza a diario un balance hídrico y de nitrógeno del cual deriva unos factores de déficit hídrico y de nitrógeno que permiten modular el crecimiento respecto del potencial.

El modelo CERES-Maize es capaz de predecir de forma precisa la variabilidad de rendimiento, la absorción de nitrógeno y la respuesta del crecimiento al nitrógeno (Pang *et al.* 1997; Bert *et al.* 2007), y de evaluar manejos de nitrógeno para maximizar la capacidad de retorno del campo y para minimizar el impacto ambiental mediante el uso de prácticas de manejo agronómico específicos de

cada lugar (Pang *et al.* 1998; Batchelor *et al.* 2002; Link *et al.* 2006; Miao *et al.* 2006; Thorp *et al.* 2008).

Jagtap *et al.* (1993) reportaron que el modelo CERES-Maize predijo el rendimiento de grano, el peso de tallo y hojas, y la biomasa aérea dentro del 10% de la data observada, lo que significa que las reglas de reparto consideradas por el modelo son adecuadas y robustas.

### **3.3.1. Principios básicos de la simulación de cultivos con el modelo CERES-Maize**

Ritchie, *et al.* (1998), expresaron que en su más simple forma, la biomasa total (BT) de un cultivo es el producto de la tasa de crecimiento promedio (g) por la duración del crecimiento (d) (Ecuación 1).

$$BT = g \times d \quad (1)$$

En la Tabla 1, Ritchie, *et al.* (1998) presentan varios aspectos relacionados con el crecimiento y desarrollo, los mismos que han sido obtenidos en diferentes experimentos, y que el modelo CERES intenta tomar en consideración para estimar el rendimiento del cultivo. Los mismos autores establecen dos tipos de desarrollo distintos: desarrollo por fases y morfológico. El desarrollo fásico involucra cambios en las etapas del crecimiento y está casi siempre asociado a cambios mayores en los patrones de reparto de la biomasa. Véase en la Tabla 1 que el desarrollo fásico es uno de los procesos vegetales principales, con un alto grado de diversidad de cultivares. Por otro lado, el desarrollo morfológico se refiere al inicio y fin del desarrollo de varios órganos vegetales dentro del ciclo biológico de la planta. Al modelizar las características del desarrollo morfológico se intenta proveer un estimado del número de hojas, macollos y granos que van a ser producidos por la planta.

**Tabla 1. Factores de los procesos de desarrollo y crecimiento y su sensibilidad a ciertos limitantes**

Principal factor ambiental	Crecimiento		Desarrollo	
	Masa	Extensión	Fásico	Morfológico
	Radiación solar	Temperatura	Temperatura Fotoperiodo	Temperatura
Grado de variación entre variedades	Bajo	Bajo	Alto	Bajo
Sensibilidad al déficit de agua	Bajo Marchitez y enrollamiento de hojas	Alto – estado vegetativo  Bajo – etapa de llenado de grano	Bajo – retraso en estado vegetativo	Bajo
Sensibilidad al déficit de nitrógeno	Bajo	Alto	Bajo	Bajo – tallo principal Alto – macollos y ramas

Fuente: Ritchie, J T. 1991. Wheat phasic development. In Hanks, R J; Ritchie, J T. eds. s.f. Modeling plant and soil systems. Agronomy Monograph 31: 31-54. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, US.

Asimismo, establecen que el principal factor medioambiental, que afecta a las tasas de desarrollo fásico y morfológico es la temperatura; sin embargo la respuesta a la temperatura en los dos procesos de desarrollo puede ser diferente, adicionalmente a esta influencia están las características propias de una variedad que afectan la respuesta de la planta al fotoperiodo; siendo esta una razón lógica para separar los procesos de crecimiento y desarrollo para determinar cómo las diferencias de agua y nutrientes altera cada proceso (Ritchie, *et al.* 1998).

En el modelo CERES-Maize el aumento de biomasa es calculado usando la eficiencia de uso de radiación (RUE), de modo que la biomasa producida es repartida entre hojas, tallos, raíces, mazorcas y granos. A su vez, la proporción repartida a cada órgano es determinada por la etapa de desarrollo y las condiciones generales en el crecimiento. Los principios de reparto están basados

en el concepto “fuente-sumidero” y son modificados cuando hay deficiencias de agua o nutrientes.

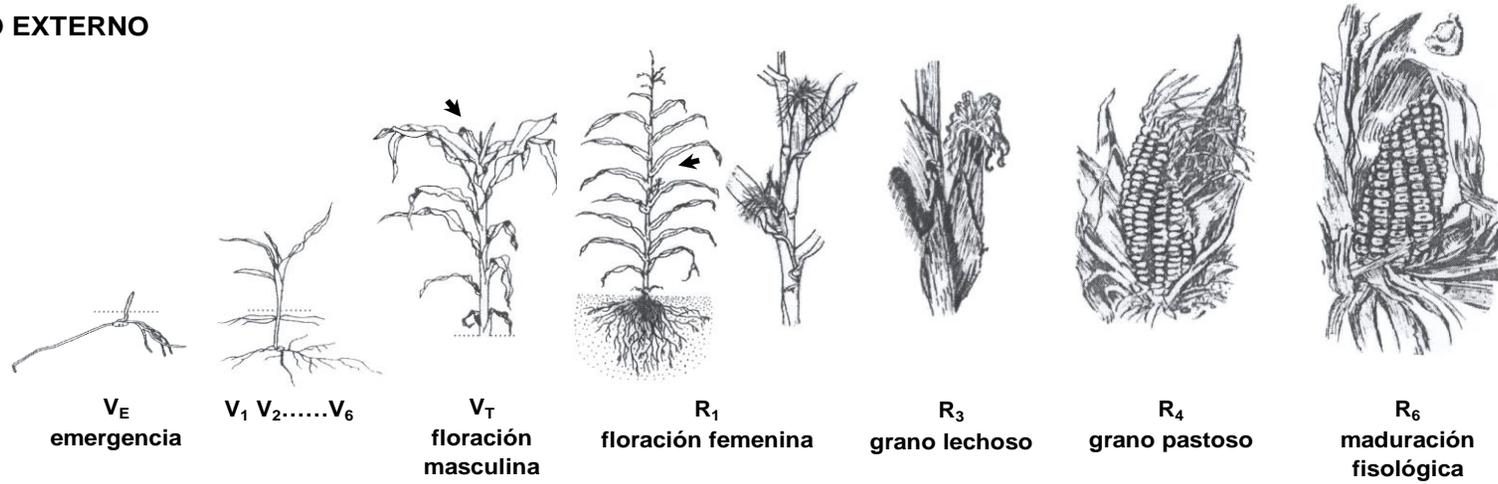
En los modelos CERES, los rendimientos son determinados como el producto del número de granos por planta por el peso promedio del grano a la madurez fisiológica. El número de granos se calcula del crecimiento de la biomasa aérea durante una fase crítica del ciclo de crecimiento para un tiempo termal corregido antes de la antesis. El peso del grano en todos los modelos CERES es calculado como una función de la tasa de crecimiento óptimo específico del cultivar multiplicado por la duración del llenado de grano. A su vez, el llenado de grano es reducido cuando hay suministro insuficiente de asimilados de la producción diaria de biomasa o de la biomasa móvil almacenada en el tallo (Ritchie *et al.* 1998).

### **3.3.2. Desarrollo de la planta**

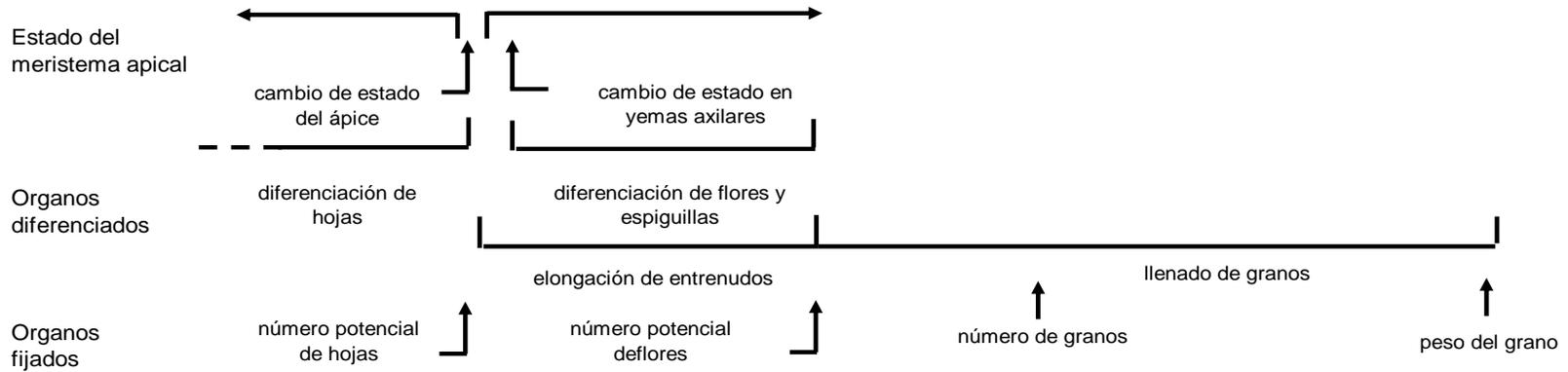
El desarrollo fásico en los modelos CERES cuantifica la edad fisiológica de la planta y describe la duración de nueve etapas de crecimiento (Figura 1). Con la excepción de la duración del barbecho o descanso, que es específico del usuario (el inicio de la simulación y la fecha de siembra), el modelo simula la duración de las etapas de desarrollo de la planta (Ritchie, *et al.* 1998).

Figura 1. Desarrollo de la planta de maíz

**ESTADO EXTERNO**



**ESTADO INTERNO**



Fuente: Ritchie et al., 1998

### 3.3.3. Influencia de la temperatura en el desarrollo

La temperatura es uno de los factores más importantes que determinan el crecimiento, y desarrollo de la planta. Todos los procesos biológicos responden a la temperatura, y todas estas respuestas se pueden reducir a términos de tres temperaturas cardinales: una base o mínima, una óptima y una máxima. Un resumen exacto de la respuesta de la planta a la temperatura es un prerrequisito para el buen modelaje de sistemas de cultivo y aplicación a modelos de manejo (Hunt *et al.* s.f.)

El rendimiento potencial de biomasa de un cultivo puede ser calculado como producto de la tasa de acumulación de biomasa por la duración del crecimiento. A su vez, la tasa de acumulación de biomasa está influenciada principalmente por la cantidad de luz interceptada por las plantas en un rango óptimo de temperatura. La duración del crecimiento de un cultivar en particular, sin embargo, es altamente dependiente de su ambiente térmico y en cierta medida del fotoperiodo durante la inducción floral. Así, el modelado exacto de la duración del cultivo y de la tasa de crecimiento es necesario para una estimación razonable del rendimiento (Ritchie, *et al.* 1998).

En un rango de temperatura limitado, la tasa de desarrollo o crecimiento de la planta es usualmente una función lineal de la temperatura. En este rango, el tiempo requerido para desarrollar hasta una cierta fase está relacionada con la suma de las temperaturas diarias sobre una temperatura base específica. Tal modelo lineal es conveniente y efectivo cuando la temperatura no se acerca o excede el óptimo (Summerfield y Roberts, 1987).

Conocer las temperaturas máxima y mínima para el crecimiento y desarrollo de un genotipo, y la naturaleza de la superficie de respuesta, es de vital importancia para la exitosa predicción de su maduración, adaptación y rendimiento en un ambiente particular. Así, los modelos usan el tiempo térmico acumulado para definir la edad de la planta y para avanzar en la ontogenia de eventos de desarrollo, con las temperaturas óptima y base variando por cultivo. Adicionalmente, la temperatura del suelo en lugar de la temperatura del aire podría ser usada para el desarrollo temprano. En CERES-

Maize, la temperatura del suelo se usa para el estadio V10 (décima hoja) o para la iniciación de la panoja, cuando el punto de crecimiento está cerca al suelo (Singh, 1985).

Wilkins y Singh (2001) explican que en los modelos CERES, la acumulación de tiempo térmico diario conduce el desarrollo del cultivo, donde el tiempo térmico ( $T_d$ ) está definido por la sumatoria de las diferencias entre la temperatura media diaria ( $T_a$ ) y la temperatura base ( $T_b$ ) (Ecuación 2).

$$T_d = \sum_{i=1}^n (T_a - T_b) \quad (2)$$

### **3.4. Calibración y validación de los modelos de simulación de cultivos**

Las funciones de temperatura (y derivadas) en los modelos CERES influyen directamente en el desarrollo fásico, crecimiento, temperatura del suelo, balance del agua del suelo y las transformaciones de nitrógeno. Las funciones usadas en el modelo CERES están basadas en el entendimiento de estos procesos. Como es de esperarse, algunas simplificaciones han hecho que la calibración y validación de un modelo sean por lo tanto pasos esenciales (Wilkins y Singh. 2001).

En la evaluación del modelo podemos distinguir entre la calibración, que se realiza habitualmente buscando el valor de los parámetros que minimizan las discrepancias entre el modelo y una serie de datos experimentales, y la validación, en la que se determina la bondad del modelo calibrado contrastando sus resultados con datos experimentales diferentes (independientes) de los empleados en la fase de calibración (Jones y Luiten, 1998).

Popova y Kercheva (2005) explican que el objetivo de la calibración no es sólo proporcionar al modelo los parámetros de entrada necesarios, sino también ajustar los parámetros inexactos comparando las predicciones del modelo con sus respectivos valores observados.

En un estudio realizado por Popova y Kercheva (2005), la habilidad del modelo CERES-Maize, después de la calibración, para hacer predicciones sobre una gama de N-divisiones sin más ajustes en los parámetros fue comparado con la información independiente recolectada en el mismo campo pero en otro lisímetro y en los siguientes dos años (prueba de extrapolación). La buena calidad de las predicciones del modelo fue evaluada con métodos gráficos y estadísticos (regresión lineal, coeficiente de determinación  $R^2$  y el error cuadrático medio RMSE). Las pruebas gráficas compararon los simulados y medidos de los mismos tratamientos en un cierto periodo.

Durante la validación del modelo CERES-Maize en un estudio realizado en un ambiente mediterráneo, Mastrorilli *et al.* (2003) graficaron las variaciones de algunas variables relevantes (tales como índice de área foliar, rendimiento de grano y biomasa aérea acumulada) como una función del número de días después de la siembra para tener una mejor descripción de las dinámicas simuladas.

## **IV. Materiales y Métodos**

### **4.1 Ubicación del campo experimental**

El trabajo de investigación fue realizado en los terrenos del fundo de la Universidad Nacional Agraria, La Molina (latitud 12°05'S, longitud 76°57'W, altitud 238 msnm). Se sembraron dos parcelas experimentales; una parcela conducida bajo riego por gravedad y otra bajo riego por goteo.

En las parcelas de riego por gravedad se probaron dos niveles de densidad; y en las parcelas de riego por goteo se probaron tres diferentes niveles de riego.

## **4.2 Descripción de los híbridos de maíz amarillo duro**

### **4.2.1 Híbrido de maíz amarillo duro PM 213**

Las características más saltantes de este cultivar son las siguientes:

Adaptación: todo el año en la costa norte, verano costa central

Periodo vegetativo: 150 a 160 días

Altura de planta: 2.20 – 2.40 m

Altura de mazorca: 1.40 – 1.50m

Mazorcas por planta: 1.5

Grano anaranjado, semiduro

Potencial de rendimiento: 12 000 kg/ha

### **4.2.2 Híbrido de maíz amarillo duro Experimental 5**

Las características más saltantes de este cultivar son las siguientes:

Adaptación: meses de invierno en costa central

Periodo vegetativo: 160 a 180 días

Altura de planta: 2.50 – 2.80 m

Altura de mazorca: 1.40 – 1.80m

Mazorcas por planta: 1.5

Resistente a tumbada

Grano anaranjado, semiduro

Potencial de rendimiento: 12 000 kg/ha

### **4.2.3 Híbrido de maíz amarillo duro Inti 8420**

Las características son las siguientes:

Adaptación: amplia adaptabilidad a distintas zonas

Periodo vegetativo: Verano 110 – 120 días

	Invierno 140 – 150 días
Altura de planta:	1.90 – 2.30 m
Mazorcas por planta:	1.3 – 1.6
Rendimiento promedio:	11 000 kg/ha

### **4.3 Información edáfica**

Para una mejor caracterización edáfica y determinación de los coeficientes hídricos del suelo se realizaron calicatas en las dos parcelas experimentales.

En la parcela de riego por gravedad se realizó una calicata observando 2 horizontes claramente definidos. El primer nivel fue de una profundidad de 0-28 cm. con una clase textural franco, el segundo nivel fue de los 28 a 80 cm de profundidad, mostrando una clase textural franco arcilloso limoso.

En la parcela de riego por goteo también se realizó una calicata observando 2 horizontes claramente definidos. El primer nivel fue de una profundidad de 0-20 cm y en segundo nivel fue de 20 a 80 cm, ambos con una clase textural franco.

Para ambas calicatas y en cada muestra por horizonte se realizó el análisis de caracterización físico-químico del suelo. La toma de muestras se realizó haciendo un corte vertical en una de las paredes del hoyo de aproximadamente una pulgada de espesor, tratando que se incluya uniformemente suelo de todo el horizonte evaluado. Las muestras fueron enviadas al Laboratorio del Análisis de Suelo y Aguas de la Universidad Nacional Agraria La Molina, los resultados de estos análisis se muestran en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Análisis de suelo para la parcela de maíz amarillo duro conducido con riego por gravedad

<b>Parámetros</b>	<b>Horizonte 1</b>	<b>Horizonte 2</b>
Longitud (m)	0.28	0.27
Presencia de Capa restrictiva (sí/no)	no	no
Profundidad de la capa restrictiva (m)	-	-
Contenido de arena (%)	33	13
Contenido de limo (%)	45	51
Contenido de arcilla (%)	22	36
Clase textural	Fr.	Fr. Ar. L.
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.57	1.5
Nitrato (ppm)	22.22	8.2
Amonio (ppm)	1.82	1.44
Fósforo total (ppm)	7.1	1.7
Potasio total (ppm)	123	36
Contenido de Materia Orgánica (%)	0.94	0.36
N orgánico % (calculado)	0.55	0.21
C orgánico % (calculado)	5.47	2.09
pH	8.35	8.29
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC en meq/100g)	11.52	9.92
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC en cmol/kg)	11.52	9.92
C.E. (dS/m)	0.35	0.47
Mg +2 (meq/100g)	1.28	1.6
Ca +2 (meq/100g)	9.48	7.9
K+ (meq/100g)	0.52	0.21
Na + (meq/100g)	0.24	0.21
Al+3 + H+ (meq/100g)	0	0
CaCO <sub>3</sub> (%)	3.8	12.4
CaCO <sub>3</sub> (mg/kg)	38000	124000

Fuente: Análisis de caracterización, Laboratorio de Análisis de Suelos y Agua. 2014

**Tabla 3. Análisis de suelo para la parcela de maíz amarillo duro conducido con riego por goteo**

<b>Parámetros</b>	<b>Horizonte 1</b>	<b>Horizonte 2</b>
Longitud (m)	0.2	0.8
Presencia de Capa restrictiva (sí/no)	-	-
Profundidad de la capa restrictiva (m)	-	-
Contenido de arena (%)	68	20
Contenido de limo (%)	26	22
Contenido de arcilla (%)	6	18
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.41	1.71
Nitrógeno orgánico (%) calculado	0.12	0.12
Carbono orgánico (%) calculado	1.16	1.16
Nitrato (ppm)	1.72	3.78
Amonio (ppm)	1.44	1.4
Fósforo total (ppm)	1	1.5
Potasio total (ppm)	39	82
Mg +2 (meq/100g)	1.28	2.4
Al+3 + H+ (meq/100g)	0	0
Ca +2 (meq/100g)	4.32	3.8
Contenido de Materia Orgánica (%)	0.2	0.2
pH (1:1)	7.87	7.97
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	6.08	6.8
C.E. (dS/m)	0.92	1.15
CacO3 (%)	0.4	5.5

Fuente: Análisis de caracterización, Laboratorio de Análisis de Suelos y Agua. 2014

## 4.4 Diseño experimental

### 4.4.1 Ensayo bajo riego por gravedad

En este ensayo se utilizó el diseño estadístico de bloques completos al azar (D.B.C.A.), con 4 repeticiones. Los factores fueron dos: híbrido de maíz amarillo duro y densidad de siembra; constituyéndose 6 tratamientos. El DBCA (Ecuación 3) garantiza el agrupamiento de las unidades experimentales de forma tal, que el efecto del “bloqueo” es efectivo en mejorar la precisión experimental de los datos. Según Pedroza y Dicoovsky (2006) el bifactorial en B.C.A. permite estudiar por un lado los efectos principales, o acción independiente de los factores y por otro lado se estudia el efecto interacción entre ellos.

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \rho_k + \epsilon_{ij} \quad (3)$$

Donde “i” y “j” corresponden a los niveles del factor H “híbrido” y del factor D “densidad” respectivamente. “k” corresponde a las repeticiones o bloques, mientras que “μ” estima la media poblacional, “α<sub>i</sub>” el efecto del i-ésimo nivel del factor H y “β<sub>j</sub>” el efecto debido al j-ésimo nivel del factor D. Por su parte, el efecto de interacción entre los factores H y D está representado por “(αβ)<sub>ij</sub>”, el efecto del k-ésimo bloque por “ρ<sub>k</sub>” y efecto aleatorio de variación por “ε<sub>ijk</sub>”, hallándose así la k-ésima observación del i-ésimo tratamiento (Y<sub>ijk</sub>).

### 4.4.2 Ensayo bajo riego por goteo

En el ensayo de riego por goteo se trabajó un diseño experimental de parcelas divididas (Ecuación 4). Los factores estudiados fueron híbrido de maíz amarillo duro y lámina de agua aplicada, constituyéndose 9 tratamientos. En este diseño, tanto las parcelas como las subparcelas generalmente corresponden a la definición de “tratamiento=proceso”, y por otro lado, los bloques generalmente son de efectos aleatorios (León Velarde y Quiroz, 1994).

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + (\beta) + (\tau \beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau \gamma)_{ik} + (\beta \gamma)_{jk} + (\tau \gamma \beta)_{ijk} + (e)_{ijk} \quad (4)$$

Donde  $\tau_i$ ,  $\beta$  y  $(\tau \beta)_{ij}$  corresponden a la parcela completa y se refieren respectivamente a los bloques (factor A), los tratamientos principales (factor B) y al error de la parcela completa (AB), en tanto  $\gamma_k$ ,  $(\tau \gamma)_{ik}$ ,  $(\beta \gamma)_{jk}$ ,  $(\tau \gamma \beta)_{ijk}$  y  $(e)_{ijk}$  corresponden a las subparcelas y se refieren respectivamente al tratamiento de la subparcela (factor C), y a las interacciones AC y BC y al error de la subparcela.

## 4.5 Distribución de las parcelas experimentales

### 4.5.1 Ensayo bajo riego por gravedad

El área total del campo experimental fue de 1352m<sup>2</sup>, teniendo 33.8m de largo y 40m de ancho, y estuvo dividido en 24 parcelas (unidades experimentales) de 46.08m<sup>2</sup> (Figura 2).

**Figura 2. Distribución de las unidades experimentales, durante la evaluación de 03 híbridos de maíz amarillo duro con 02 niveles de densidad de siembra, en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014.**

H2D2	H2D1	H1D2	H1D1	H3D2	H3D1
406	405	404	403	402	401
<hr/>					
H1D1	H2D2	H3D2	H1D2	H3D1	H2D1
301	302	303	304	305	306
<hr/>					
H3D2	H1D1	H3D1	H2D2	H1D2	H2D1
206	205	204	203	202	201
<hr/>					
H1D2	H3D1	H1D1	H2D2	H3D2	H2D1
101	102	103	104	105	106

Donde “H” y “D” representan a los factores híbrido y densidad respectivamente, según la siguiente leyenda:

**Híbridos de maíz amarillo duro:**

H1: PM-213

H2: Experimental 5

H3: Inti 8420

**Densidades de siembra:**

D1: 72917 plantas/ha

D2: 65972 plantas/ha

**4.5.2 Ensayo bajo riego por goteo**

El área total del campo experimental fue de 316.8m<sup>2</sup>, teniendo 18m de largo y 17.6m de ancho, y estuvo dividido en 36 parcelas (unidades experimentales) de 6.75m<sup>2</sup>.

Las tres láminas de riego en estudio fueron asignadas aleatoriamente a nivel de parcelas dentro de cada bloque, así como los híbridos de maíz amarillo duro a nivel de sub parcelas, dentro de cada parcela (Figura 3).

**Figura 3. Distribución de las unidades experimentales, durante la evaluación de 03 híbridos de maíz amarillo duro con 03 láminas de riego, en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014.**

Bloque 1			Bloque 2			Bloque 3			Bloque 4		
L1	L2	L3	L2	L1	L3	L1	L3	L2	L1	L3	L2
H3	H1	H3	H2	H3	H2	H1	H3	H1	H1	H2	H3
H2	H2	H2	H1	H1	H1	H2	H2	H2	H3	H3	H2
H1	H3	H1	H3	H2	H3	H3	H1	H3	H2	H1	H1

Dónde “H” y “L” representan los factores híbrido y lámina de agua respectivamente, según la siguiente leyenda:

**Híbridos de maíz amarillo duro:**

H1: PM-213

H2: Inti 8420

H3: Experimental 5

**Láminas de riego:**

L1: 4 705 m<sup>3</sup>/ha

L2: 3 529 m<sup>3</sup>/ha

L3: 2 352 m<sup>3</sup>/ha

## **4.6 Conducción del ensayo experimental**

### **4.6.1 Ensayo bajo riego por gravedad**

Este ensayo experimental constó de un terreno de 1352 m<sup>2</sup> dividido en 24 parcelas de producción, las cuales fueron conducidas bajo el mismo manejo agronómico. Las labores culturales y de sanidad fueron hechas a un nivel estándar de modo que no afectaran los resultados de los tratamientos (Anexo 3).

En primer lugar se realizó el riego de machaco, aproximadamente 20 días antes de la siembra. Previo a la instalación del cultivo se realizó las labores de preparación del terreno y de formación de parcelas de 6.4 m de ancho, 7.2 m de largo. Asimismo, se marcó las calles y delimitó el terreno.

Cada unidad experimental constaba de 8 surcos, en los que se sembró 21 ó 19 golpes de acuerdo al tratamiento. El día 15 de setiembre de 2014 se sembró el maíz directamente poniendo 4 semillas en cada golpe. Al desahíje, se dejó dos plantas por golpe.

A lo largo de la campaña se realizó 9 riegos (aparte del riego de machaco fertilizaciones (Anexo 5).

Finalmente la cosecha se llevó a cabo el 26 de febrero de 2015.

### **4.6.2 Ensayo bajo riego por goteo**

Este ensayo experimental constó de 36 parcelas de producción repartidas en cuatro bloques. Todas las parcelas fueron conducidas bajo las mismas labores agronómicas, a excepción del riego, ya que el régimen hídrico variaba de acuerdo a cada tratamiento (Anexo 4)

En primer lugar se realizó la preparación del terreno, que constó de la remoción de tierra con pico y lampa, antes de la formación de camas de 1.25m de ancho y 5.4m de

largo. El 20 de junio de 2014 se realizó la siembra manual por golpes en hileras, depositando 3 semillas por golpe, cada 12 cm. Al desahije, se dejó sólo una planta por golpe para mantener la densidad de siembra de aproximadamente 62 200 plantas/ha.

En cuanto a la fertilización, se realizó 4 aplicaciones de ácido fosfórico, 10 de nitrato de amonio y 10 de nitrato potásico, con el fin de proporcionar al suelo 80 kg/ha de  $P_2O_5$ , 160 kg/ha de N y 160 kg/ha de  $K_2O$ . Los fertilizantes fueron diluidos en agua y aplicados manualmente al pie de la planta de acuerdo al cronograma pre-establecido (Anexo 8).

A lo largo de la campaña se realizó 10 riegos, los cuales fueron diferenciados de acuerdo al tratamiento (Anexo 7). Las parcelas “L1” recibieron un volumen total de 4773.6 m<sup>3</sup>/ha, las “L2,” 3665.7 m<sup>3</sup>/ha; y las “L3,” 2386.8 m<sup>3</sup>/ha, considerándose como regímenes hídricos alto, medio y bajo respectivamente.

Finalmente, la cosecha se realizó el 18 de diciembre del mismo año.

#### **4.7 Evaluación fenológica y biométrica**

Estas observaciones se realizaron en ambos ensayos, y en cada unidad experimental para luego tener valores promedio por tratamiento.

##### **4.7.1 Evaluaciones fenológicas**

Para realizar la evaluación de la fenología, se marcó 5 metros lineales en el surco central y se observó todas las plantas comprendidas en ese espacio. Luego se registró los datos en términos de porcentaje.

##### **a) Emergencia**

Esta observación se realizó visualmente, de manera interdiaria, contando las plantas emergidas. Se hizo 3 evaluaciones registrando el porcentaje de aparición de plantas.

Se consideró que el campo había alcanzado la “etapa de emergencia cuando” el 50 por ciento de la población de plantas había emergido.

#### **b) Aparición de hojas**

Se evaluó las hojas que estuvieran completamente expandidas y la última hoja cuyo ápice estuviera visible. Se registró las hojas expandidas con la letra “V,” por ejemplo una planta que tenía 2 hojas completamente expandidas se registraría como V2, 4 hojas (V4), 6 hojas (V6), 8 hojas (V8) y así sucesivamente hasta la floración masculina, es decir hasta que se viera la panoja. Se consideró que la planta tenía una hoja nueva cuando se veía su ápice (punta) y se registraba con la letra “T”. Por ejemplo, si una planta tiene el código “V6T8” significa que tiene 6 hojas expandidas completamente y su última hoja es la número 8. Esta evaluación tenía una frecuencia de dos veces por semana.

#### **c) Floración masculina o antesis**

Conociendo las características genotípicas de cada híbrido en particular, se definió hacer esta evaluación desde que la planta tenía 15 a 17 hojas completamente expandidas. Teniendo esto en cuenta, se empezó a hacer las evaluaciones 2 semanas antes de la floración estimada, evaluando 2 veces por semana cada parcela. Se tomó nota de la antesis cuando el 50 por ciento de las plantas presentaron la panoja visible y esta emitía polen.

#### **d) Madurez fisiológica**

Hay dos formas de evaluar la madurez fisiológica, mediante la observación de la capa negra y por medio del porcentaje de humedad del grano. Para ambos casos se tomó como muestra 2 mazorcas al azar, siempre tomando la primera mazorca de la planta (la más cercana a la panoja).

- Capa negra: La mazorca se partió por la mitad y se observó si los granos del medio, punta y base de la mazorca presentaban la capa negra.

- Porcentaje de humedad del grano: La mazorca se partió por la mitad y se tomó 20 granos de la parte media de la mazorca. Luego se pesaron (materia fresca) y se llevó a estufa por 24 horas a 65°C. Finalmente se pesó nuevamente (materia seca) y se halló el porcentaje de humedad. Cuando este porcentaje llegó a 35% se registró como madurez fisiológica.

#### **4.7.2 Evaluaciones biométricas**

Para realizar las evaluaciones de biometría se seleccionó 4 plantas de uno de los surcos centrales y se evaluó siempre estas mismas plantas marcadas. Para facilitar las evaluaciones se marcó las hojas con plumón indeleble indicando su número.

##### **a) Densidad poblacional**

Se evaluó la densidad poblacional en tres momentos: emergencia, floración masculina y a la maduración fisiológica. Para hallar la densidad poblacional se contó el número de plantas en una parcela y se dividió entre el área, obteniéndose el número de plantas por ha o m<sup>2</sup>.

##### **b) Número final de hojas**

Se evaluó el número de hojas en la floración masculina.

##### **c) Altura de planta**

Se midió la longitud en cm desde el cuello de planta hasta su extremo más alto.

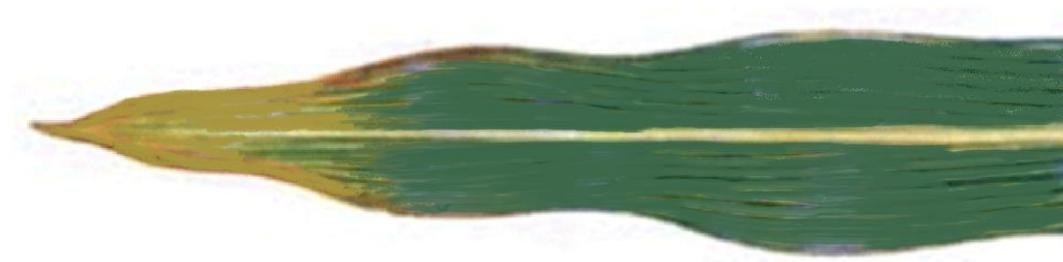
##### **d) Índice de área foliar**

Para hallar el índice de área foliar (IAF), en primer lugar se debe registrar el área foliar y la senescencia.

e) **Senescencia:** Se evaluó la senescencia una vez por semana durante el periodo vegetativo. Para ello se observaba las hojas de cada planta y se registraba el porcentaje de senescencia que presentaba cada hoja en ese momento. El porcentaje se determina a criterio del evaluador.

Ejemplos:

**Figura 4. Hoja de maíz con 25% de senescencia**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4 se muestra una hoja que presenta el 25% de senescencia porque la cuarta parte tiene marchitamiento.

**Figura 5. Hoja de maíz con 0% de senescencia**



Fuente: Biblioteca Dekalb. 2015.

En la Figura 5 se muestra una hoja con 0% de senescencia porque toda está verde.

Para evaluar senescencia se considera 0, 25, 50, 75 y 100%.

- f) **Área foliar:** Para hallar el área foliar se evaluó los siguientes parámetros:
- Longitud de la hoja (L): se midió desde la aurícula hasta el ápice de la hoja central
  - Ancho de la hoja (A): se midió el eje central de la lámina de la hoja.

Para calcular el área foliar, se empleó la Ecuación 5:

$$AF = L \times A \times 0.75 \quad (5)$$

Dónde:

AF = área foliar (cm<sup>2</sup>)

L = longitud de la hoja (cm)

A = ancho de la hoja (cm)

0.75 = factor de corrección que se usa porque la hoja no tiene forma de un cuadrilátero perfecto

Cuando la hoja estaba totalmente expandida y la lígula estaba separada ya no fue necesario volver a medir el área foliar de esta hoja porque ya se detuvo su crecimiento.

Para ello es importante anotar el área foliar correspondiente a cada hoja. Para hojas en crecimiento se tomó el largo desde el ápice hasta la intersección de la hoja que se está midiendo con la siguiente, y el ancho era el de la base (Figura 6)

**Figura 6. Medición de largo de la hoja de maíz.**



El índice de área foliar se calculó dividiendo el total de área foliar de cada planta entre el área disponible para cada planta por hectárea (Mckee, 1964).

**g) Biomasa**

Se realizó esta evaluación cada 15 días. En primer lugar, se escogía 2 plantas por parcela, luego se cortaban sus órganos separándolos en bolsas kraft (tallos, hojas, mazorcas, panoja, etc.). Luego se pesaban con una balanza electrónica para determinar la materia fresca en gramos. Posteriormente se colocaba en una estufa u horno a 70°C por 72 horas. Al término de este tiempo se pesaba las muestras y se obtenía la materia seca en gramos.

**h) Porcentaje de humedad del grano**

Se tomó 10 mazorcas al azar del total de mazorcas cosechadas en la parcela. A estas mazorcas se les desgranó tres hileras para obtener una muestra de 300g por parcela. Posteriormente se calculó la humedad del grano utilizando un determinador de humedad analógico.

**i) Número de granos por mazorca**

Se tomó una muestra de 5 mazorcas al azar del total de mazorcas cosechadas por parcela y se contó el número de granos de cada una de ellas, luego se sacó un promedio.

**j) Peso de grano**

Se separó 5 grupos de 100 granos cada uno y se midió su peso fresco. Se corregirá el peso de estos al 0 por ciento de humedad y se dividió entre 100 para obtener el peso promedio de 1 grano.

### k) Rendimiento

El rendimiento se calculó utilizando la Ecuación 6, proporcionada por Lizaso (2014).

$$R = \frac{NG \times PG \times D}{100} \quad (6)$$

Dónde “R” es el rendimiento (kg/ha), “NG” representa el número de granos por planta, “PG” es el peso de un grano (mg) y “D” es la densidad (pl/m<sup>2</sup>).

### l) Índice de cosecha

El día de la cosecha se tomó una muestra de dos plantas por parcela. Se partió los órganos y se colocaron en bolsas de papel kraft, para luego colocarlas en una estufa a 70<sup>0</sup>C por 72 horas. Al término de este tiempo se pesó las muestras y se obtuvo peso seco total de los granos cosechados y el peso seco total de la parte aérea de cada planta. Se determinó el índice de cosecha con la siguiente relación:

$$IC = \frac{\text{Peso seco total de granos}}{\text{Peso seco total de la parte aérea}} \times 100 \quad (7)$$

## 4.8 Calibración del modelo CERES-Maize

Un aspecto importante en el funcionamiento del modelo CERES-Maize constituye los denominados coeficientes genéticos, que según Bowen (1997), son constantes que describen la sensibilidad de cada cultivar a la temperatura y al fotoperiodo, definiendo la floración y la maduración fisiológica, principalmente. Este autor añade que estos coeficientes deben ser estimados a partir de información provenientes de ensayos con óptimas condiciones de desarrollo.

Para el cultivo de maíz según el modelo CERES-Maize se han definido los siguientes coeficientes genéticos, los cuales se detallan a continuación:

**P1:** es el tiempo térmico (expresado en grados día, superior a una temperatura base de 8°C), durante el cual la planta no es sensible a cambios en el fotoperiodo, y comprende desde la emergencia hasta el inicio de la floración.

**P2:** es la sensibilidad manifiesta de la planta al aumento o disminución del fotoperiodo. En nuestro medio este coeficiente es igual a cero, ya que los días tienen una duración más o menos equivalente a 12 horas durante todo el año.

**P5:** tiempo térmico (expresado en grados día, superior a una temperatura base de 8°C), desde la floración femenina hasta la maduración fisiológica.

**G2:** es el potencial número de granos por planta.

**G3:** tasa de crecimiento de los granos, bajo óptimas condiciones, expresada en mg/día.

**PHINT:** es el intervalo en tiempo térmico (grados día), entre las apariciones de los extremos de hojas sucesivas.

#### **4.8.1 Proceso de calibración**

1. Durante el proceso de calibración se llevó a cabo el paso enumerado en (a) si la duración del fotoperiodo fue menos de 14 h, los de (b) si la duración del fotoperiodo fue entre 14 h y 16 h, o los de (c) si la duración del fotoperiodo fue mayor que 16 h (Bowen, 1997).

a. Examinar y observar la concordancia entre la fecha de floración masculina predicha y observada. Si la fecha predicha de floración fuera posterior (o anterior) que el observado, disminuir (o aumentar) el valor de P1 (la primera variable) en el archivo genético. El cambio necesario puede aproximarse a muchas condiciones al restar el valor predicho del observado y multiplicando por 7. Repita hasta que se obtenga un ajuste razonable.

b. Examinar y observar la concordancia entre la fecha de floración predicha y observada. Si la fecha predicha de floración fuera posterior (o anterior) que el

observado disminuir (o aumentar) el valor de P2 (la primera variable) en el archivo genético. Repita los pasos 3 y 4 hasta obtener un ajuste razonable, o hasta que P2 varíe por 0,2 unidades de la suposición inicial. Si lo último ocurre, aumentar (o disminuir) P1 (la primera variable en el archivo genético) hasta obtener un ajuste razonable, o hasta que P1 difiera por 100 unidades de la suposición inicial. Regrese a P2 si fuera necesario.

- c. Examinar y observar la concordancia entre la fecha de floración predicha y observada. Si la fecha predicha de floración fuera posterior (o anterior) que el observado, disminuir (o aumentar) el valor de P2 (la segunda variable) en el archivo genético. Repita hasta que se obtenga un ajuste razonable.
2. Examinar y observar la concordancia entre los días predichos y actuales a la madurez fisiológica. Si no es satisfactorio, aumentar (o disminuir según convenga) P5 (la tercera variable en el archivo genético). El cambio necesario puede aproximarse a muchas condiciones al restar el valor predicho del observado y multiplicando por 10. Repita y recambiar el coeficiente hasta que se obtenga un ajuste satisfactorio.
  3. Examinar y observar la concordancia entre predicho y un número real de granos por m<sup>2</sup>. Cambiar G2 (la cuarta variable en el archivo genético) a un valor obtenido por la multiplicación del cociente de granos (m<sup>2</sup>) observado y predicho, repetir y re-comparar según sea considerado necesario.
  4. Examinar y observar la concordancia entre el peso del grano predicho y observado. Ajustar G3 (la quinta variable), a un valor obtenido por la multiplicación del cociente del peso del grano observado y predicho, repetir y re-comparar según sea considerado necesario.

Para el presente ensayo se utilizó el paso “a.” Para concluir ello se analizó la ubicación geográfica de la localidad de La Molina y se determinó que el fotoperiodo en dicho

lugar es menor de 14 horas por tener latitud de 12° (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, 2002. Citado por SENAMHI, 2003).

#### 4.9 Validación del modelo

El modelo CERES-Maize se validó comparando los datos observados con los obtenidos de la simulación de cada uno de los tratamientos utilizando el paquete de coeficientes genéticos que se hallaron en la etapa de calibración para cada híbrido. De esta forma se pudo cuantificar el grado de predicción del modelo de algunas variables como número de granos por planta, peso seco de un grano, número final de hojas, día de la antesis, día de la madurez fisiológica, entre otros. Por otro lado, la materia seca aérea y el índice de área foliar se consideraron para una evaluación general del modelo.

Para validar el modelo se utilizaron diferentes índices estadísticos como la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) (Ecuación 8), el índice de concordancia (D-index) (Ecuación 9) y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ).

$$RMSE = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \times \frac{100}{M} \quad (8)$$

En las ecuaciones de RMSE e índice de concordancia, “n” representa el número de observaciones, “Pi” es la observación predicha, “Oi” es la observación medida, donde  $P'_i = P_i - M$  y  $O'_i = O_i - M$ , siendo “M” la media de la variable observada.

RMSE normalizado entrega una medida en porcentaje de la diferencia relativa de los datos simulados en comparación con los observados. La simulación se considera como excelente, con un RMSE normalizado menor de 10%, es bueno cuando el RMSE normalizado es superior a 10% pero menor que 20%, es justo si el RMSE normalizado es mayor que 20% y menor 30% y deficiente si es mayor a 30%.

El índice de concordancia (D-index) propuesto por Willmott et al. (1985), se estimó de acuerdo estadístico  $d$ , en donde si este índice es cercano a uno, mejor será la comparación entre las dos variables (simulada y observada).

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad (9)$$

Finalmente, para hallar el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) se realizó un análisis de regresión con Microsoft Excel 2010.

## V. Resultados y discusión

### 5.1 Calibración del modelo

La calibración del modelo CERES-Maize fue efectuada con los datos de campo del ensayo experimental conducido bajo riego por gravedad en la Universidad Nacional Agraria La Molina, sembrado el 15 de setiembre de 2014 y cosechado el 26 de febrero de 2015. Se escogió este ensayo experimental por contar con todos los parámetros agronómicos para realizar la calibración.

Para los tres híbridos en estudio (PM-213; Experimental 5; Inti 8420) el coeficiente genético **P2** fue atribuido el valor igual a 0.4, que es un valor predeterminado para híbridos tropicales y representa la sensibilidad manifiesta de la planta al aumento o disminución del fotoperiodo (Jones y Kiniry, 1986).

Los coeficientes genéticos de **P1**; **PHINT** y **P5** fueron ajustados por el método comparativo entre los datos observados en el campo y datos simulados. Se calibraron simultáneamente el **P1** y **PHINT** con las variables de número final de hojas y día de la floración masculina, mientras que el **P5** con el día de maduración fisiológica. Se

consideró necesario establecer parámetros de confiabilidad de que los coeficientes obtenidos realmente ajustaban los datos simulados a los reales, para esto se realizó una estadística descriptiva para determinar el promedio, desviación estándar y el coeficiente de variabilidad. Sin embargo, estos coeficientes genéticos quedan con un margen de error, ya que no fueron medidos en un experimento considerado exclusivamente como parcelas de calibración, motivo por el cual constituye una limitación en las aproximaciones que haga el modelo en su utilización. Además las variables que determinan los coeficientes genéticos no son fáciles de medir, ya que para ello se requiere de experimentación en cabinas de crecimiento con óptimas condiciones de temperatura, luminosidad y humedad, así como en la dotación de nutrientes. De esa forma, se escogió los códigos genéticos que presentaron menores valores de desviación estándar y coeficiente de variabilidad; como fue sugerido por Lizaso (2014).

Los coeficientes **G2** y **G3** se determinan a partir de las variables número de granos por planta, rendimiento y peso seco de grano. Las parcelas de experimentación deben ser de preferencia cultivadas a baja densidad, sin deficiencias de agua y nutrientes, cuando las temperaturas diarias medias oscilan entre 20°C a 30°C. Los sets de coeficientes genéticos fueron elegidos de las parcelas con baja densidad, tal como lo menciona Jones y Kiniry (1986).

Para realizar las calibraciones de los híbridos de maíz amarillo duro es recomendable trabajar con distintas fechas de siembra y densidades diferentes, porque los modelos con los nuevos coeficientes ya calibrados deben ser capaces de captar las diferencias en fechas y densidades, es decir debemos trabajar en el ajuste hasta lograr un único juego de coeficientes por cada material genético y/o híbrido. En un estudio llevado a cabo al noreste de China, Liu *et al.*(2012) concluyeron que calibrar los 6 coeficientes de maíz no es suficiente para simular correctamente la biomasa aérea, el rendimiento y la absorción de nitrógeno, ya que es necesario calibrar adicionalmente la eficiencia de uso de radiación (RUE), los grados día para la emergencia (GDDE), el coeficiente de estrés por nitrógeno (CTCNP2) y el factor de fertilidad del suelo (SLPF).

En las Tablas 4; 5 y 6, se observan las variables (número final de hojas, rendimiento, número de granos, pesos seco de grano, anthesis y maduración fisiológica) que fueron usadas para realizar las comparaciones entre lo observado en el campo y lo simulado por el modelo, y los valores de los coeficientes genéticos para cada híbrido.

En la Tabla 4 se observa los coeficientes genéticos del híbrido de maíz amarillo duro PM-213 con dos densidades (D1: 72 917 plantas/ha y D2: 65 972 plantas/ha) obtenidos de acuerdo a lo detallado en la metodología. En las dos densidades encontramos valores similares para **P1**=286 y **PHINT**=45.4, para el coeficiente genético **P5** valores diferentes en D1=640 y D2=620, para **G2** valores diferentes en ambas densidades D1=1700 y D2=942, también se observaron valores diferentes para G3 en D1=15 y D2=12. Luego de realizar este análisis comparativo se determinaron los coeficientes genéticos para el híbrido PM-213, tal como se observa en la Tabla 7 para **P1**=286, **P2**=0.4, **P5**=620, **G2**=942, **G3**=12 y **PHINT**=45.4.

Los valores de **P1** y **P5** encontrados en el experimento concuerdan con los hallados experimentalmente por Kiniry *et al.* (1983a, b) los cuales encontraron valores para **P1** entre 110 a 360 y para **P5** entre 685 a 900, y que además fueron medidos para una gran variedad de cultivares que crecieron en ambientes controlados. Los valores de coeficientes genéticos fueron elegidos de las parcelas con baja densidad y fueron similares a los diferentes experimentos de cultivares de maíz realizados por Jones y Kiniry (1986) que encontraron para **G2** valores que oscilaron entre 520 a 834 y **G3** entre 5.6 a 10.5. La tasa de crecimiento de los granos fue estimado muestreando los granos del tercio medio de cada mazorca, comenzando 10 días después de la emisión de a estigma y continuando hasta justo antes del inicio de la maduración fisiológica (Duncan y Hatfield, 1964).

En la Tabla 5, se observa los coeficientes genéticos para el híbrido Experimental 5 con dos densidades (D1: 72 917 plantas/ha y D2: 65 972 plantas/ha); en donde se observa valores similares para **P1** en D1=287 y D2=286 y valores diferentes para **PHINT** en D1= 44.2 y D2=42.7; para el coeficiente genético **P5** valores diferentes en D1=660 y

D2=630, para **G2** se observaron valores diferentes en ambas densidades D1=1220 y D2=1120, para **G3** en D1=16.9 y D2=17.3.

Luego de realizar este análisis comparativo se determinaron los coeficientes genéticos para el híbrido Experimental 5, usando como prioridad los valores de la parcela de baja densidad, tal como se observa en la Tabla 7 para **P1**=286, **P2**=0.4, **P5**=630, **G2**=1120, **G3**=17.3 y **PHINT**=42.7; estos coeficientes genéticos fueron similares con los observados en los diferentes experimentos de cultivares de maíz realizados por Jones y Kiniry (1986).

En la Tabla 6 se observa los coeficientes genéticos para el maíz Inti 8420 para las dos densidades (D1: 72 917 plantas/ha y D2: 65 972 plantas/ha); en donde se observa valores similares para ambas densidades en **P1**=286 y **PHINT**=44.8; para el coeficiente genético **P5** valores diferentes en D1=610 y D2=580, para **G2** se observaron valores diferentes en ambas densidades D1=1573 y D2=1200, para **G3** en D1=16.8 y D2=18.1.

Luego de realizar este análisis comparativo se determinaron los coeficientes genéticos para el maíz Inti 8420, tal como se observa en la Tabla 7 para **P1**=286, **P2**=0.4, **P5**=580, **G2**=1200, **G3**=18.1 y **PHINT**=44.8; estos coeficientes genéticos fueron similares con los observados en los diferentes experimentos de cultivares de maíz realizados por Jones y Kiniry (1986).

**Tabla 4. Calibración del modelo CERES-Maize para determinar los coeficientes genéticos en el cultivo de maíz amarillo duro PM-213 en dos densidades de siembra (D1: 72 917 plantas/ha y D2 65 972 plantas/ha), en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014-2015**

Híbrido	Densidad (plantas/ha)	Comparación	Variables					Coeficientes genéticos						
			Número final de hojas	Rendimiento (kg/ha)	Número de granos (Nº granos/planta)	Peso seco de grano (mg)	Antesis (dds)	Madurez fisiológica (dds)	P1	PHINT	P5	G2	G3	
PM-213	72 917	<b>Observado</b>	21.13	10905.19	519.20	0.324	94	139						
		simulación 1	20.84	8711.00	519.00	0.243	94	139	286	45.35	640	1473	12.2	
		Promedio	20.98	9808.10	519.10	0.28	94	139						
		DS	0.20	1551.53	0.14	0.06	0.00	0.00						
		CV	0.96	15.82	0.03	20.18	0.00	0.00						
		<b>simulación 2</b>	<b>20.84</b>	<b>8722.00</b>	<b>591.30</b>	<b>0.214</b>	<b>94</b>	<b>139</b>	<b>286</b>	<b>45.35</b>	<b>640</b>	<b>1700</b>	<b>15</b>	
		Promedio	20.98	9813.60	555.25	0.27	94	139						
		DS	0.20	1543.75	50.98	0.08	0.00	0.00						
		CV	0.96	15.73	9.18	29.01	0.00	0.00						
		<b>simulación 3</b>	<b>20.84</b>	<b>8718.00</b>	<b>559.50</b>	<b>0.226</b>	<b>94</b>	<b>139</b>	<b>286</b>	<b>45.35</b>	<b>640</b>	<b>1600</b>	<b>12.7</b>	
		Promedio	20.98	9811.60	539.35	0.27	94	139						
		DS	0.20	1546.58	28.50	0.07	0.00	0.00						
		CV	0.96	15.76	5.28	25.29	0.00	0.00						
		<b>simulación 4</b>	<b>21.27</b>	<b>8709.00</b>	<b>519.20</b>	<b>0.24</b>	<b>93</b>	<b>139</b>	<b>285</b>	<b>43.5</b>	<b>640</b>	<b>1526</b>	<b>13</b>	
		Promedio	21.20	9807.10	519.20	0.28	94	139						
		DS	0.10	1552.94	0.00	0.06	0.71	0.00						
		CV	0.48	15.83	0.00	20.20	0.76	0.00						
		<b>simulación 5</b>	<b>21.27</b>	<b>8717.00</b>	<b>597.20</b>	<b>0.21</b>	<b>93</b>	<b>139</b>	<b>285</b>	<b>43.5</b>	<b>640</b>	<b>1780</b>	<b>15</b>	
		Promedio	21.20	9811.10	558.20	0.27	94	139						
		DS	0.10	1547.28	55.15	0.08	0.71	0.00						
CV	0.48	15.77	9.88	29.74	0.76	0.00								
PM-213	65 972	<b>Observado</b>	21.31	7307.11	338.00	0.299	94	138						
		simulación 1	20.84	7305.00	354.20	0.344	94	138	286	45.35	620	851	13.1	
		Prom	21.08	7306.06	346.10	0.32	94	138						
		DS	0.33	1.49	11.46	0.03	0.00	0.00						
		CV	1.59	0.02	3.31	9.82	0.00	0.00						
		<b>simulación 2</b>	<b>20.84</b>	<b>7306.00</b>	<b>386.70</b>	<b>0.315</b>	<b>94</b>	<b>138</b>	<b>286</b>	<b>45.35</b>	<b>620</b>	<b>942</b>	<b>12</b>	
		Prom	21.08	7306.56	362.35	0.31	94	138						
		DS	0.33	0.78	34.44	0.01	0.00	0.00						
		CV	1.59	0.01	9.50	3.63	0.00	0.00						
		<b>simulación 3</b>	<b>20.84</b>	<b>7298.00</b>	<b>353.80</b>	<b>0.344</b>	<b>94</b>	<b>138</b>	<b>286</b>	<b>45.35</b>	<b>620</b>	<b>850</b>	<b>13.1</b>	
		Prom	21.08	7302.56	345.90	0.32	94	138						
		DS	0.33	6.44	11.17	0.03	0.00	0.00						
		CV	1.59	0.09	3.23	9.82	0.00	0.00						
		<b>simulación 4</b>	<b>20.84</b>	<b>7312.00</b>	<b>354.50</b>	<b>0.34</b>	<b>94</b>	<b>138</b>	<b>286</b>	<b>45.35</b>	<b>620</b>	<b>852</b>	<b>13.1</b>	
		Prom	21.08	7309.56	346.25	0.32	94.0	138						
		DS	0.33	3.46	11.67	0.03	0.00	0.00						
		CV	1.59	0.05	3.37	9.82	0.00	0.00						
		<b>simulación 5</b>	<b>20.84</b>	<b>7293.00</b>	<b>386.00</b>	<b>0.31</b>	<b>94</b>	<b>138</b>	<b>286</b>	<b>45.35</b>	<b>620</b>	<b>940</b>	<b>12</b>	
		Prom	21.08	7300.06	362.00	0.31	94.0	138						
		DS	0.33	9.98	33.94	0.01	0.00	0.00						
CV	1.59	0.14	9.38	3.63	0.00	0.00								

**Tabla 5. Calibración del modelo CERES-Maize para determinar los coeficientes genéticos en el cultivo de maíz amarillo duro Experimental 5 en dos densidades de siembra (D1: 72 917 plantas/ha y D2: 65 972 plantas/ha), en la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2014-2015**

Híbrido	Densidad (plantas/ha)	Comparación	Variables					Coeficientes genéticos					
			Número final de hojas	Rendimiento (kg/ha)	Número de granos (Nº granos/planta)	Peso seco de grano (mg)	Antesis (dds)	Madurez fisiológica (dds)	P1	PHINT	P5	G2	G3
			Observado										
Experimental 5	72 917	Observado	21.31	9859.35	470.76	0.345	93	140					
		simulación 1	<b>20.98</b>	<b>8634.00</b>	<b>470.50</b>	<b>0.306</b>	<b>93</b>	<b>140</b>	<b>287</b>	<b>44.2</b>	<b>660</b>	<b>1220</b>	<b>16.9</b>
		Prom	21.15	9246.68	470.63	0.33	93	140					
		DS	0.24	866.45	0.18	0.03	0.00	0.00					
		CV	1.11	9.37	0.04	8.55	0.00	0.00					
		simulación 2	21.27	8623.00	470.50	0.306	93	140	285	43.5	660	1215	17.8
		Prom	21.29	9241.18	470.63	0.33	93	140					
		DS	0.03	874.23	0.18	0.03	0.00	0.00					
		CV	0.14	9.46	0.04	8.64	0.00	0.00					
		simulación 3	20.98	8613.00	470.50	0.305	93	140	287	44.2	660	1220	15
	Prom	21.15	9236.18	470.63	0.33	93	140						
	DS	0.24	881.30	0.18	0.03	0.00	0.00						
	CV	1.11	9.54	0.04	8.74	0.00	0.00						
	simulación 4	20.98	8622.00	473.90	0.30	93	140	287	44.2	660	1230	14	
	Prom	21.15	9240.68	472.33	0.32	93.0	140						
	DS	0.24	874.94	2.22	0.03	0.00	0.00						
	CV	1.11	9.47	0.47	9.18	0.00	0.00						
	simulación 5	21.27	8583.00	482.60	0.30	93	140	285	43.5	660	1250	17	
	Prom	21.29	9221.18	476.68	0.32	93.0	140						
	DS	0.03	902.52	8.37	0.03	0.00	0.00						
CV	0.14	9.79	1.76	10.77	0.00	0.00							
Observado	21.69	10564.93	445.78	0.348	93	138							
simulación 1	<b>21.63</b>	<b>8578.00</b>	<b>446.60</b>	<b>0.343</b>	<b>93</b>	<b>138</b>	<b>286</b>	<b>42.7</b>	<b>630</b>	<b>1120</b>	<b>17.3</b>		
Prom	21.66	9571.47	446.19	0.35	93	138							
DS	0.04	1404.97	0.58	0.00	0.00	0.00							
CV	0.19	14.68	0.13	0.98	0.00	0.00							
simulación 2	21.63	8588.00	506.80	0.303	93	138	286	42.7	630	1290	17.3		
Prom	21.66	9576.47	476.29	0.33	93	138							
DS	0.04	1397.90	43.15	0.03	0.00	0.00							
CV	0.19	14.60	9.06	9.82	0.00	0.00							
simulación 3	21.63	8578.00	446.60	0.342	93	138	286	42.7	630	1120	17.6		
Prom	21.66	9571.47	446.19	0.34	93	138							
DS	0.04	1404.97	0.58	0.00	0.00	0.00							
CV	0.19	14.68	0.13	1.29	0.00	0.00							
simulación 4	21.63	8559.00	506.80	0.30	93	138	286	42.7	630	1290	17.4		
Prom	21.66	9561.97	476.29	0.32	93.0	138							
DS	0.04	1418.41	43.15	0.03	0.00	0.00							
CV	0.19	14.83	9.06	10.06	0.00	0.00							
simulación 5	21.63	8525.00	443.00	0.34	93	138	286	42.7	630	1110	17.3		
Prom	21.66	9544.97	444.39	0.35	93.0	138							
DS	0.04	1442.45	1.97	0.00	0.00	0.00							
CV	0.19	15.11	0.44	0.86	0.00	0.00							

**Tabla 6. Calibración del modelo CERES-Maize para determinar los coeficientes genéticos en el cultivo de maíz amarillo duro Inti 8420 en dos densidades de siembra (D1: 72 917 plantas/ha y D2: 65 972 plantas/ha), en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014-2015.**

Híbrido	Densidad (plantas/ha)	Comparación	Variables						Coeficientes genéticos				
			Número final de hojas	Rendimiento (kg/ha)	Número de granos (Nº granos/planta)	Peso seco de grano (mg)	Antesis (dds)	Madurez fisiológica (dds)	P1	PHINT	P5	G2	G3
Inti 8420	72 917	<b>Observado</b>	19.94	10868.18	562.00	0.311	93	137					
		simulación 1	19.49	8415.00	562.00	0.234	93	137	276	47.3	620	1683	15
		Prom	19.71	9641.59	562.00	0.27	93	137					
		DS	0.32	1734.66	0.00	0.05	0.00	0.00					
		CV	1.61	17.99	0.00	19.99	0.00	0.00					
		simulación 2	19.49	8413.00	597.60	0.220	93	137	276	47.3	620	1800	20
		Prom	19.71	9640.59	579.80	0.27	93	137					
		DS	0.32	1736.07	25.17	0.06	0.00	0.00					
		CV	1.61	18.01	4.34	24.25	0.00	0.00					
		<b>simulación 3</b>	<b>20.73</b>	<b>8466.00</b>	<b>562.00</b>	<b>0.235</b>	<b>93</b>	<b>137</b>	<b>286</b>	<b>44.8</b>	<b>610</b>	<b>1573</b>	<b>16.8</b>
	Prom	20.33	9667.09	562.00	0.27	93	137						
	DS	0.56	1698.60	0.00	0.05	0.00	0.00						
	CV	2.76	17.57	0.00	19.55	0.00	0.00						
	simulación 4	20.73	8295.00	562.00	0.23	93	137	286	44.8	610	1573	16.9	
	Prom	20.33	9581.59	562.00	0.27	93.0	137						
	DS	0.56	1819.51	0.00	0.06	0.00	0.00						
	CV	2.76	18.99	0.00	20.97	0.00	0.00						
	simulación 5	20.73	8458.00	562.00	0.24	93	137	286	44.8	610	1573	16.7	
	Prom	20.33	9663.09	562.00	0.27	93.0	137						
	DS	0.56	1704.25	0.00	0.05	0.00	0.00						
CV	2.76	17.64	0.00	19.60	0.00	0.00							
Inti 8420	65 972	<b>Observado</b>	19.88	8995.38	456.21	0.267	93	136					
		simulación 1	<b>20.73</b>	<b>8217.00</b>	<b>456.30</b>	<b>0.295</b>	<b>93</b>	<b>136</b>	<b>286</b>	<b>44.8</b>	<b>580</b>	<b>1200</b>	<b>18.1</b>
		Prom	20.30	8606.19	456.26	0.28	93	136					
		DS	0.60	550.40	0.06	0.02	0.00	0.00					
		CV	2.98	6.40	0.01	7.03	0.00	0.00					
		simulación 2	19.49	8054.00	456.10	0.290	93	136	276	47.3	600	1285	11.9
		Prom	19.68	8524.69	456.16	0.28	93	136					
		DS	0.27	665.66	0.08	0.02	0.00	0.00					
		CV	1.38	7.81	0.02	5.65	0.00	0.00					
		simulación 3	20.73	7912.00	455.60	0.285	93	136	286	44.8	580	1198	12
		Prom	20.30	8453.69	455.91	0.28	93	136					
		DS	0.60	766.07	0.43	0.01	0.00	0.00					
		CV	2.98	9.06	0.09	4.47	0.00	0.00					
		simulación 4	20.73	8076.00	456.30	0.29	93	136	286	44.8	580	1200	18.2
		Prom	20.30	8535.69	456.26	0.28	93.0	136					
DS	0.60	650.10	0.06	0.02	0.00	0.00							
CV	2.98	7.62	0.01	5.80	0.00	0.00							
simulación 5	19.49	7955.00	456.10	0.29	93	136	276	47.3	600	1285	11.5		
Prom	19.68	8475.19	456.16	0.28	93.0	136							
DS	0.27	735.66	0.08	0.01	0.00	0.00							
CV	1.38	8.68	0.02	4.77	0.00	0.00							

**Tabla 7. Coeficientes genéticos de tres híbridos de maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) en la parcela experimental de riego por gravedad, en la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2014.**

Híbrido	Densidad (plantas/ha)	Coeficientes Genéticos					
		P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
PM-213	65972	286	0.4	620	942	12.0	45.4
Experimental 5	65972	286	0.4	630	1120	17.3	42.7
Inti 8420	65972	286	0.4	580	1200	18.1	44.8

## 5.2 Validación del Modelo CERES-Maize

La validación del modelo CERES-Maize propuesta en este estudio consiste en una comparación de los valores estimados (usando los códigos genéticos obtenidos en la calibración) con los observados en los experimentos realizados en las parcelas donde se probó dos densidades y diferentes láminas de riego. Sin embargo, consideramos que sólo dos campañas agrícolas no son suficientes para definir óptimamente esta comparación. Cuando se realiza la validación con experimentos de diferentes años, los resultados indican buena capacidad predictiva del modelo.

Con estos ensayos se pretendió determinar la capacidad de predicción del modelo en cuanto se refiere a diferentes densidades y láminas de riego establecidas para un sistema productivo de maíz amarillo duro en la costa central, ya que dentro de la validación de un modelo siempre es necesario realizar un análisis de sensibilidad a cambios bruscos que se puedan dar en el desarrollo normal de un cultivo, con el propósito de verificar cuan efectivas resultarían las predicciones del modelo en circunstancias no previstas para los términos de normalidad.

### 5.2.1 Días a la emergencia

En la Tabla 8, se observa para los tres híbridos PM-213; Experimental 5 e INTI 8420 y para sus tratamientos D1 (65 972 plantas/ha) y D2 (72 917 plantas/ha) valores observados y simulados iguales y con un porcentaje de desviación (PD) de 0% lo que

significa que la predicción de esta variable por parte del modelo es exacto. Sin embargo para los tratamientos con diferentes láminas de riego L1 (4 705 m<sup>3</sup>/ha), L2 (3 529 m<sup>3</sup>/ha) y L3 (2 352 m<sup>3</sup>/ha), los valores observados y simulados fueron bastante similares y el PD fue de 40%, lo que muestra una variabilidad moderada con las fechas de emergencia en cada tratamiento. Además hay que puntualizar que esta observación puede estar sujeta a varios errores de observación en el campo. Por otro lado, los indicadores estadísticos del cuadrado medio del error (RMSE), el índice de concordancia (d) y el coeficiente de determinación (r<sup>2</sup>) son relativamente altos; lo cual hace prever que la falla no es de medición. El RMSE entre lo observado y simulado por el modelo para cada híbrido fue de 26.7%, por lo que la predicción del modelo para esta variable se considera justa; el índice de concordancia (d) y el coeficiente de determinación (r<sup>2</sup>) fueron de 0.87 y 1, respectivamente; considerados estadísticamente altos.

**Tabla 8. Valores medios de los días a la emergencia observados y simulados con el modelo CERES-Maize para tres híbridos de maíz amarillo duro, en la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2014-2015.**

Híbrido	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE (%)	d	R <sup>2</sup>
PM-213	D1 = 65 972 plantas/ha	11	11	0.0	26.65	0.87	1.00
	D2 = 72917 plantas/ha	11	11	0.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	5	7	40.0			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	5	7	40.0			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	5	7	40.0			
EXPERIMENTAL 5	D1 = 65 972 plantas/ha	11	11	0.0	26.65	0.87	1.00
	D2 = 72917 plantas/ha	11	11	0.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	5	7	40.0			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	5	7	40.0			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	5	7	40.0			
INTI 8420	D1 = 65 972 plantas/ha	11	11	0.0	26.65	0.87	1.00
	D2 = 72917 plantas/ha	11	11	0.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	5	7	40.0			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	5	7	40.0			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	5	7	40.0			

## 5.2.2 Días a la floración masculina (antesis)

Esta es una de las variables más importantes que se toman en cuenta, tanto mejoradores como productores de maíz, ya que es un indicador de la precocidad que tiene determinada variedad. Por lo tanto resulta necesario establecer la predicción del modelo con respecto a esta variable. En la Tabla 9, podemos observar los datos observados y simulados de días a la floración en tres híbridos de maíz amarillo duro en donde la desviación porcentual (PD) es baja para todos los tratamientos. Ello nos indica que la predicción del modelo en esta variable por parte del modelo es aceptable; sin embargo es necesario mencionar que el bajo número de muestras constituye una limitación.

En la Tabla 9, se observa para los híbridos PM-213, Experimental 5 e INTI 8420, en sus tratamientos D1 (65 972 plantas/ha) y D2 (72 917 plantas/ha) valores observados y simulados iguales y con un porcentaje de desviación (PD) de 0% lo que significa que la predicción de esta variable por parte del modelo es exacta, a pesar de que estos tratamientos fueron conducidos bajo riego por gravedad. Por otro lado para los tratamientos con diferentes láminas de riego L1 (4 705 m<sup>3</sup>/ha), L2 (3 529 m<sup>3</sup>/ha) y L3 (2 352 m<sup>3</sup>/ha) los valores observados y simulados fueron bastante similares y el PD varió entre 2.8 y 17%. Cabe señalar que esta observación puede estar sujeta a varios errores de observación en el campo; por lo que es recomendable que una misma persona realice esta observación de principio a fin.

Para el híbrido PM-213, se halló un RMSE=8.54%, lo que significa que el modelo predice excelentemente la fase de la antesis, aunado a los indicadores  $d=0.64$  y  $r^2=0.33$  considerados como altos.

**Tabla 9. Valores medios de los días a la floración masculina (antesis) observados y simulados con el modelo CERES-Maize para tres híbridos de maíz amarillo duro, en la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2014-2015.**

Híbrido	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE (%)	d	R <sup>2</sup>
PM-213	D1 = 65 972 plantas/ha	94	94	0.0	8.54	0.64	0.33
	D2 = 72917 plantas/ha	94	94	0.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	94	110	17.0			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	104	110	5.8			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	104	110	5.8			
EXPERIMENTAL 5	D1 = 65 972 plantas/ha	93	93	0.0	0.48	1.00	1.00
	D2 = 72917 plantas/ha	93	93	0.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	108	109	0.9			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	109	109	0.0			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	109	109	0.0			
INTI 8420	D1 = 65 972 plantas/ha	93	93	0.0	2.51	0.96	1.00
	D2 = 72917 plantas/ha	93	93	0.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	107	110	2.8			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	107	110	2.8			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	107	110	2.8			

### 5.2.3 Número final de hojas

Para el caso de la variable de número final de hojas, en la Tabla 10 se muestra los resultados obtenidos en campo y de la simulación, así como los indicadores estadísticos hallados. En cuanto al híbrido PM-213, la desviación tuvo un porcentaje nulo para los tratamientos en los que se probó diferentes densidades, mientras que alcanzó 11.1% en los tratamientos en los que se aplicó diferentes láminas de riego. Para el mismo híbrido, el RMSE hallado fue de 10.34%, el índice d, 0.63 y el r<sup>2</sup> 0.99.

Para el híbrido Experimental 5, los valores de RMSE, d y r<sup>2</sup> fueron de 10.3, 0.59 y 1.0 respectivamente. Este híbrido con D1 (65 972 plantas/ha) presentó un PD de 4.8%, y con D2 (72 917 plantas/ha) de 0%. Sin embargo, cuando se probó diferentes láminas de agua, resultó con un PD de 16.7% para los tres tratamientos.

Finalmente, para el híbrido Inti 8420 se halló un RMSE de 15.15%, índice d de 0.47 y r<sup>2</sup> de 1.0. No hubo diferencia de PD entre los tratamientos de densidades, siendo

ambos 5%, ni entre los tratamientos de lámina de riego, siendo PD=17.6% para cada uno de ellos.

**Tabla 10. Valores medios del número final de hojas observado y simulado con el modelo CERES-Maize para tres híbridos de maíz amarillo duro, en la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2014-2015.**

Híbrido	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE (%)	d	R <sup>2</sup>
PM-213	D1 = 65 972 plantas/ha	21	21	0.0	10.34	0.63	0.99
	D2 = 72917 plantas/ha	21	21	0.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	18	20	11.1			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	18	20	11.1			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	18	20	11.1			
EXPERIMENTAL 5	D1 = 65 972 plantas/ha	21	22	4.8	10.30	0.59	1.00
	D2 = 72917 plantas/ha	22	22	0.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	18	21	16.7			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	18	21	16.7			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	18	21	16.7			
INTI 8420	D1 = 65 972 plantas/ha	20	21	5.0	15.15	0.47	1.00
	D2 = 72917 plantas/ha	20	21	5.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	17	20	17.6			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	17	20	17.6			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	17	20	17.6			

#### 5.2.4 Máximo índice de área foliar

Para el análisis de esta variable se comparó el máximo valor de área foliar observado y el máximo valor arrojado por la simulación (Tabla 11). El modelo DSSAT/CERES-maize nos brinda resultados simulados de área foliar diarios, mientras que en la práctica el número de evaluaciones para obtener este dato es limitado, ya que resulta inviable realizar esta observación diariamente. Por esta razón, consideramos que existe la posibilidad de que el dato observado de máximo índice de área foliar no fuera exacto, pues el día preciso en el que la planta alcanzó esta condición podría no haber sido registrado. Ello podría explicar que los resultados del análisis estadístico no hayan sido satisfactorios, como se muestra en la Tabla 11.

Podemos observar que para el híbrido PM-213, los indicadores RMSE, d y r<sup>2</sup> fueron de 31.46, 0.2 y 0.06 respectivamente, mientras que el PD oscila entre -4.1 y -49.4.

Algo similar ocurre con el híbrido Experimental 5, en el que el valor de RMSE (41.51%) es muy alto y los de “d” (0.34) y  $r^2$  (0.01) muy bajos, y los PD se encuentran entre -40.3 y 36.1.

Finalmente, el híbrido Inti 8420, presentó un RMSE de 25.07%, “d” de 0.32 y  $r^2$  de 0.01. Los valores de PD para los tratamientos con D1 (65 972 plantas/ha) y D2 (72 917 plantas/ha) fueron 37.4 y 56.8% respectivamente, mientras que para los tratamientos L1 (4 705 m<sup>3</sup>/ha), L2 (3 529 m<sup>3</sup>/ha) y L3 (2 352 m<sup>3</sup>/ha) fueron -2.6, -12.1 y -24.9 respectivamente.

**Tabla 11. Valores medios del índice área foliar máximo observados y simulados con el modelo CERES-Maize para tres híbridos de maíz amarillo duro, en la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2014-2015.**

Híbrido	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE (%)	d	R <sup>2</sup>
PM-213	D1 = 65 972 plantas/ha	2.92	3.93	34.7	31.46	0.20	0.06
	D2 = 72917 plantas/ha	3.50	4.38	25.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	4.82	3.71	-23.0			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	4.95	3.71	-25.1			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	4.39	2.54	-42.1			
EXPERIMENTAL 5	D1 = 65 972 plantas/ha	3.25	4.20	29.2	41.51	0.34	0.01
	D2 = 72917 plantas/ha	2.91	3.96	36.1			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	5.18	4.06	-21.6			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	5.36	4.06	-24.3			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	4.47	2.67	-40.3			
INTI 8420	D1 = 65 972 plantas/ha	3.06	4.20	37.4	25.07	0.32	0.01
	D2 = 72917 plantas/ha	2.58	4.04	56.8			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	3.87	3.77	-2.6			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	4.29	3.77	-12.1			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	3.41	2.56	-24.9			

### 5.2.5 Peso seco de la parte aérea a la maduración fisiológica

Los valores del RMSE para los híbridos PM-213, Experimental 5 e Inti 8420 fueron 28.34, 39.75 y 28.37% respectivamente, por lo que la simulación de peso seco de la parte aérea a la maduración fisiológica por parte del modelo se considera deficiente para los tres híbridos.

El híbrido PM-213 presentó un valor de índice de concordancia de 0.33 y 0.01 de  $r^2$ . El índice  $d$  alcanzó un valor de 0.49 en el híbrido Experimental 5 y el  $r^2$  de 0.12. Mientras que para el híbrido Inti 8420 los valores “ $d$ ” y  $r^2$  fueron 0.59 y 1.0 respectivamente. Todo ello demuestra que el modelo no simula correctamente esta variable.

En la etapa de campo hubo problemas con la disposición de estufas, por lo que las muestras de materia seca no se secaron homogéneamente, sobre todo en las últimas evaluaciones. Una mala medición del peso seco podría explicar por qué la simulación para esta variable resulta deficiente. Sin embargo, es importante considerar que los híbridos PM-213 y Experimental 5 utilizados en este ensayo, son considerados de porte alto, lo que podría explicar su gran acumulación de biomasa.

**Tabla 12. Valores medios del peso seco de la parte aérea a la maduración fisiológica observado y simulado con el modelo CERES-Maize para tres híbridos de maíz amarillo duro, en la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2014-2015.**

Híbrido	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE (%)	$d$	$R^2$
PM-213	D1 = 65 972 plantas/ha	22702	15933	-29.8	28.34	0.33	0.01
	D2 = 72917 plantas/ha	33456	16926	-49.4			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	18090	17354	-4.1			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	22103	17354	-21.5			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	20887	13163	-37.0			
EXPERIMENTAL 5	D1 = 65 972 plantas/ha	28361	16974	-40.2	39.75	0.49	0.12
	D2 = 72917 plantas/ha	33915	16501	-51.3			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	22813	18188	-20.3			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	26029	18188	-30.1			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	17953	13741	-23.5			
INTI 8420	D1 = 65 972 plantas/ha	25395	16725	-34.1	28.37	0.59	1.00
	D2 = 72917 plantas/ha	23870	16383	-31.4			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	24081	16738	-30.5			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	14070	16738	19.0			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	12742	12686	-0.4			

### 5.2.6 Número de granos por mazorca

El parámetro número de granos por planta es crucial para determinar si el modelo predice óptimamente el rendimiento de un cultivar de maíz, ya que tiene incidencia directa en el cálculo del rendimiento.

En la Tabla 13, se puede observar que el híbrido Experimental 5 presentó un RMSE de 10.47% para esta variable, el híbrido Inti 8420 de 26.06% y PM-213 de 37.84%. De esta forma se puede comprobar que el modelo simula de manera buena, justa y deficiente la variable número de granos por planta, para los híbridos Experimental 5, Inti 8420 y PM-213 respectivamente.

**Tabla 13. Valores medios del número de granos por planta observado y simulado con el modelo CERES-Maize para tres híbridos de maíz amarillo duro, en la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2014-2015.**

Híbrido	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE (%)	d	R <sup>2</sup>
PM-213	D1 = 65 972 plantas/ha	519.2	386.7	-25.5	37.84	0.50	0.09
	D2 = 72917 plantas/ha	338.0	350.0	3.6			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	578.7	444.8	-23.1			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	625.1	444.8	-28.8			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	545.8	305.7	-44.0			
EXPERIMENTAL 5	D1 = 65 972 plantas/ha	470.8	424.7	-9.8	10.47	0.79	0.65
	D2 = 72917 plantas/ha	455.8	446.6	-2.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	485.2	515.9	6.3			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	537.9	515.9	-4.1			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	436.1	343.8	-21.2			
INTI 8420	D1 = 65 972 plantas/ha	562.0	440.6	-21.6	26.06	0.43	0.39
	D2 = 72917 plantas/ha	456.2	456.3	0.0			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	560.4	555.4	-0.9			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	533.7	555.4	4.1			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	504.9	375.8	-25.6			

### 5.2.7 Peso seco de grano

Tal como el número de granos por planta, el peso seco de grano tiene una relación directamente proporcional con el rendimiento, por lo que su validación es crucial para la aceptación de un modelo de simulación.

En este caso, en la Tabla 14 se puede observar que el modelo CERES-Maize puede predecir de forma buena el peso seco de grano para los híbridos Experimental 5 e Inti 8420 y de forma justa para el híbrido PM-213, ya que se halló RMSE de 13.75, 17.13 y 22.4 respectivamente.

Por otro lado, ninguno de los híbridos presentó valores altos de índice de concordancia ni de coeficiente de determinación. Se halló valores medios de “d” para PM-213 (0.43) y Experimental 5 (0.45), y bajo para Inti 8420 (0.13). Mientras que en el caso de  $r^2$ , Experimental 5 e Inti 8420 presentaron valores bajos (0.03 y 0.01) y PM-213 medio (0.25).

**Tabla 14. Valores medios del peso seco de granos observado y simulado con el modelo CERES-Maize para tres híbridos de maíz amarillo duro, en la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2014-2015.**

Híbrido	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE (%)	d	R <sup>2</sup>
PM-213	D1 = 65 972 plantas/ha	0.324	0.315	-2.8			
	D2 = 72917 plantas/ha	0.299	0.313	4.8			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	0.253	0.318	26.0	22.40	0.43	0.25
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	0.243	0.318	30.9			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	0.272	0.383	40.8			
EXPERIMENTAL 5	D1 = 65 972 plantas/ha	0.345	0.339	-1.7			
	D2 = 72917 plantas/ha	0.348	0.342	-1.8			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	0.298	0.286	-3.9	13.75	0.45	0.03
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	0.252	0.286	13.7			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	0.280	0.359	28.3			
INTI 8420	D1 = 65 972 plantas/ha	0.311	0.295	-5.3			
	D2 = 72917 plantas/ha	0.267	0.295	10.6			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	0.249	0.233	-6.3	17.13	0.13	0.01
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	0.251	0.233	-7.0			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	0.235	0.289	22.9			

### 5.2.8 Porcentaje de Nitrógeno en el grano

Para esta variable se observa en la Tabla 15 alta variabilidad con respecto al PD% para todos los tratamientos; así mismo se observa que el modelo CERES-Maize predice deficientemente para los híbridos PM-213 y Experimental 5, con RMSE% de 42 y 52, respectivamente; sin embargo para el híbrido INTI 8420 la predicción es buena con un RMSE% de 11. Lo más probable es que se haya cometido errores en la determinación práctica del porcentaje de nitrógeno; así como las dificultades que existieron en la calibración con respecto a esta variable.

Por otro lado, ninguno de los híbridos presentó valores altos de índice de concordancia, encontrándose los siguientes valores medios de “d” para PM-213 (-0.14) y Experimental 5 (-0.08), y bajo para Inti 8420 (-0.41). Mientras que en el caso de  $r^2$  para los tres híbridos fue de 1.

**Tabla 15. Valores medios del porcentaje de Nitrógeno en el grano observado y simulado con el modelo CERES-Maize para tres híbridos de maíz amarillo duro, en la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2014-2015.**

Hibrido	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE (%)	d	R <sup>2</sup>
PM-213	D1 = 65 972 plantas/ha	1.62	1.60	-1.2			
	D2 = 72917 plantas/ha	1.20	1.60	33.3			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha				42.0	-0.14	1.00
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	1.82	1.70	-6.6			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha						
EXPERIMENTAL 5	D1 = 65 972 plantas/ha	0.92	1.60	73.9			
	D2 = 72917 plantas/ha	1.32	1.60	21.2			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha				52.0	-0.08	1.00
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	1.82	1.70	-6.6			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha						
INTI 8420	D1 = 65 972 plantas/ha	1.62	1.60	-1.2			
	D2 = 72917 plantas/ha	1.40	1.60	14.3			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha				11.0	-0.41	1.00
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	1.09	1.70	56.0			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha						

## 5.2.9 Rendimiento

El rendimiento constituye la variable más importante en términos de predicción ya que es la que en último término define la aceptación de determinada tecnología por parte de los agricultores. A pesar de que las pruebas estadísticas (Tabla 15) muestran que en algunos tratamientos los valores simulados son cercanos a los reales, se aprecian diferencias considerables entre estos.

En la Tabla 16 se observa que el híbrido PM-213 presentó en sus tratamientos D2 (72 917 plantas/ha), L1 (4 705 m<sup>3</sup>/ha) y L2 (3 529 m<sup>3</sup>/ha) valores observados y simulados bastante similares y el porcentaje de desviación (PD) vario entre -6.4% y 3.6%. Los tratamientos D1 (65 972 plantas/ha) y L3 (2 352 m<sup>3</sup>/ha) presentaron PD muy bajos, entre -33 y -20.6%, lo que significa que el modelo CERES-Maize subestima los

rendimientos con respecto a los observados en campo. El cuadrado medio del error (RMSE) entre lo observado y simulado por el modelo para cada tratamiento fue de 10.9%, por lo que la predicción del modelo se considera como buena. Sin embargo el índice de concordancia (d) es relativamente bajo y fue de 0.54.

Para Experimental 5, se obtuvieron rendimientos observados y simulados similares para la tres láminas de riego L1 (4 705 m<sup>3</sup>/ha), L2 (3 529 m<sup>3</sup>/ha) y L3 (2 352 m<sup>3</sup>/ha) con un PD bajo, entre 1.3 y 9.6%. Sin embargo, respecto a las densidades D2 (72 917 plantas/ha) y D1 (65 972 plantas/ha) tuvieron PD muy bajos, -19.2 y -12.3% respectivamente, lo que significa que para estos tratamientos el modelo subestima el rendimiento con relación a lo observado en campo. El RMSE entre lo observado y simulado por el modelo fue de 14.1%, por lo que la predicción del modelo se considera buena. Por otro lado, el índice de concordancia (d) es relativamente bajo (0.45) (Tabla 16).

Para el híbrido INTI 8420, los rendimientos observados y simulados fueron similares para la tres láminas de riego L1 (4 705 m<sup>3</sup>/ha), L2 (3 529 m<sup>3</sup>/ha) y L3 (2 352 m<sup>3</sup>/ha) y D2 (72 917 plantas/ha) con un PD bajo, entre -8.7% y -3.8%, lo cual significa que el modelo subestima los rendimientos. No obstante, para la densidad D1 (65 972 plantas/ha) se obtuvo un PD de -23.6%, lo que significa que existe una alta subestimación del rendimiento por parte del modelo. El RMSE fue 5.3%, por lo que se considera una excelente predicción del modelo para este híbrido y con alto índice de concordancia (d) de 0.87 (Tabla 16).

**Tabla 16. Valores medios de rendimiento observado y simulado con el modelo CERES-Maize para tres híbridos de maíz amarillo duro, en la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2014-2015.**

Híbrido	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE (%)	d	R <sup>2</sup>
PM-213	D1 = 65 972 plantas/ha	10905.2	7306.0	-33.0	10.87	0.54	0.06
	D2 = 72917 plantas/ha	7307.1	7568.0	3.6			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	9125.9	8780.0	-3.8			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	9376.9	8780.0	-6.4			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	9151.2	7263.0	-20.6			
EXPERIMENTAL 5	D1 = 65 972 plantas/ha	9859.4	8646.0	-12.3	14.07	0.45	0.01
	D2 = 72917 plantas/ha	10564.9	8541.0	-19.2			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	9016.0	9161.0	1.6			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	8354.8	9161.0	9.6			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	7554.8	7655.0	1.3			
INTI 8420	D1 = 65 972 plantas/ha	10868.2	8303.0	-23.6	5.27	0.87	0.65
	D2 = 72917 plantas/ha	8995.4	8217.0	-8.7			
	L1 = 4 705 m <sup>3</sup> /ha	8623.6	8038.0	-6.8			
	L2 = 3 529 m <sup>3</sup> /ha	8356.2	8038.0	-3.8			
	L3 = 2 352 m <sup>3</sup> /ha	7358.5	6725.0	-8.6			

### 5.2.10 Índice de área foliar

El índice de área foliar fue calculado a partir de la base de datos obtenida de nueve evaluaciones de área foliar que se hicieron a lo largo de la campaña de cada uno de los ensayos. En el gráfico de correlación (Figura 7) se observa que para los tres híbridos y en todos los tratamientos se obtuvo coeficientes de determinación cercanos a 1.

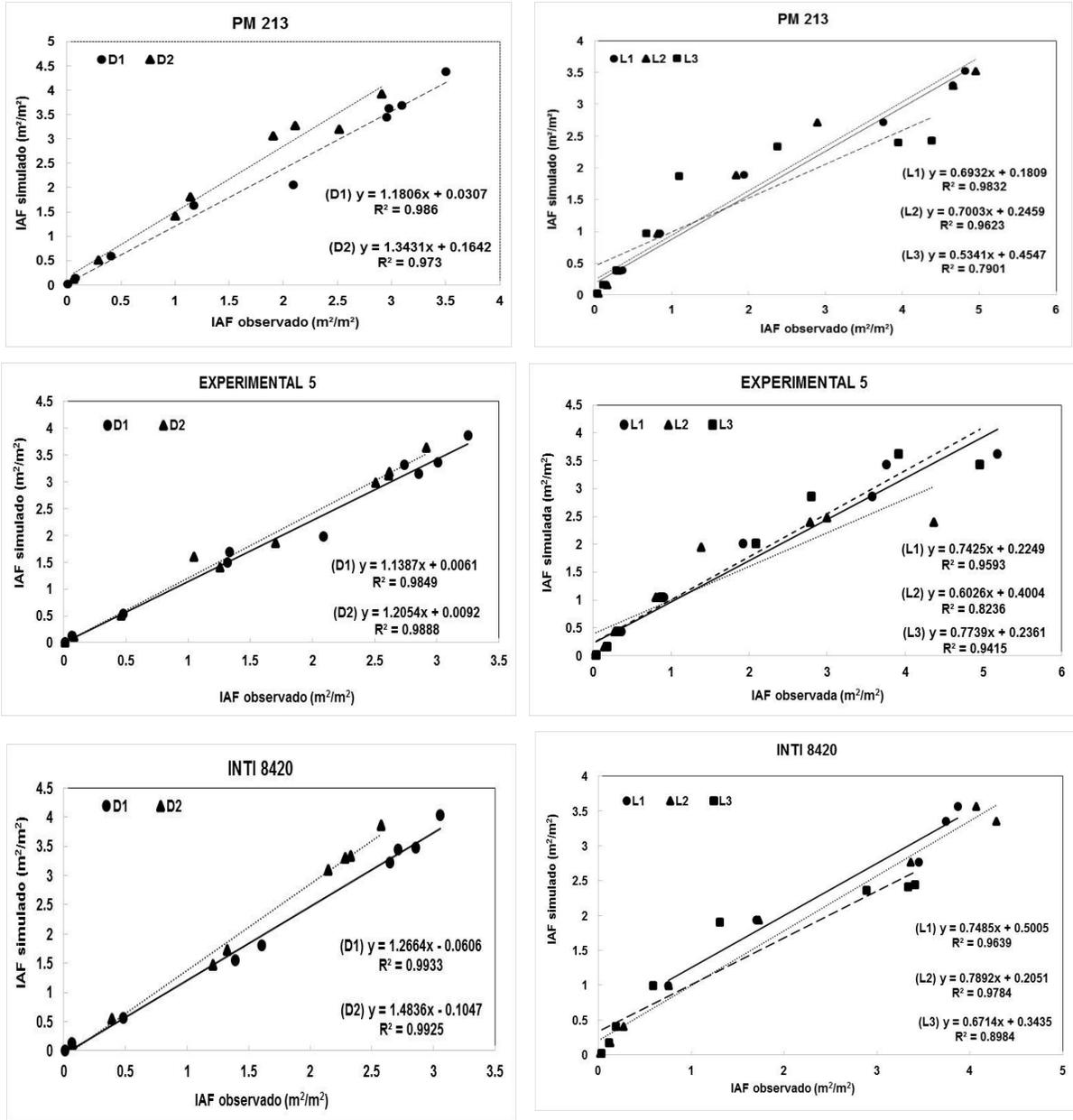
Además se analizó el cuadrado medio del error y el índice de concordancia para cada tratamiento. Resultando que el para el híbrido PM-213, bajo la densidad D1 (65 972 plantas/ha) se obtuvo un RMSE de 21.64%, mientras que con la densidad D2 (72 917 plantas/ha) de 38.3% (Figura 8). El análisis de los tratamientos bajo las tres láminas de riego L1 (4 705 m<sup>3</sup>/ha), L2 (3 529 m<sup>3</sup>/ha) y L3 (2 352 m<sup>3</sup>/ha) también arrojó valores de RMSE altos, 47.1; 43.6 y 70.8% respectivamente. A pesar de ello, los índices de concordancia para todos los casos del híbrido PM-213 fueron altos.

Por su parte, en cuanto al híbrido Experimental 5, con las densidades D1 (65 972 plantas/ha) y D2 (72 917 plantas/ha) se obtuvo valores aceptables de RMSE (17.24 y

21.2%), mientras que con los tratamientos L1 (4 705 m<sup>3</sup>/ha), L2 (3 529 m<sup>3</sup>/ha) y L3 (2 352 m<sup>3</sup>/ha) se alcanzó valores de RMSE muy altos (36.3; 32.4 y 56.1% respectivamente) que indican que la performance del modelo en estos casos es deficiente.

Finalmente, al probar las dos densidades con el híbrido Inti 8420 se obtuvo un RMSE de 24.8% para D1 (65 972 plantas/ha) y de 37.8% para D2 (72 917 plantas/ha). En el caso de los tratamientos con láminas de riego, se obtuvo un resultado bueno (RMSE=19.5%) sólo con L1 (4 705 m<sup>3</sup>/ha), pues con L2 (3 529 m<sup>3</sup>/ha) y L3 (2 352 m<sup>3</sup>/ha) el RMSE resultó 27.2 y 42.9% respectivamente.

Figura 7. Gráfico de correlación del índice de área foliar observada y simulada con el modelo CERES-Maize de tres híbridos de maíz amarillo duro, en la Universidad Agraria La Molina. 2014-2015.



**Figura 8. Índice de área foliar observada y simulada con el modelo CERES-Maize de tres híbridos de maíz amarillo duro conducidos bajo dos densidades de siembra, en la Universidad Agraria La Molina. 2014-2015.**

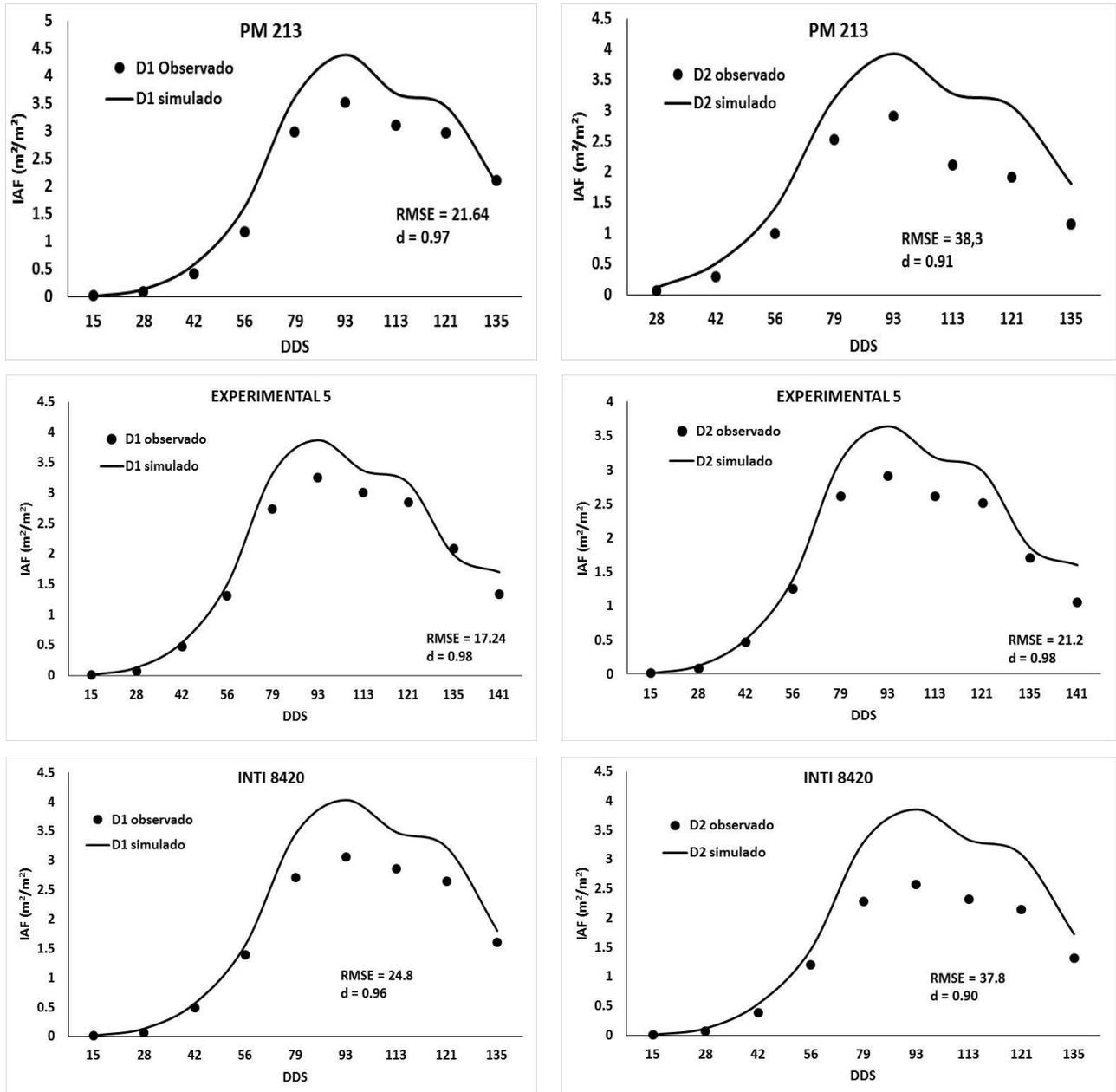
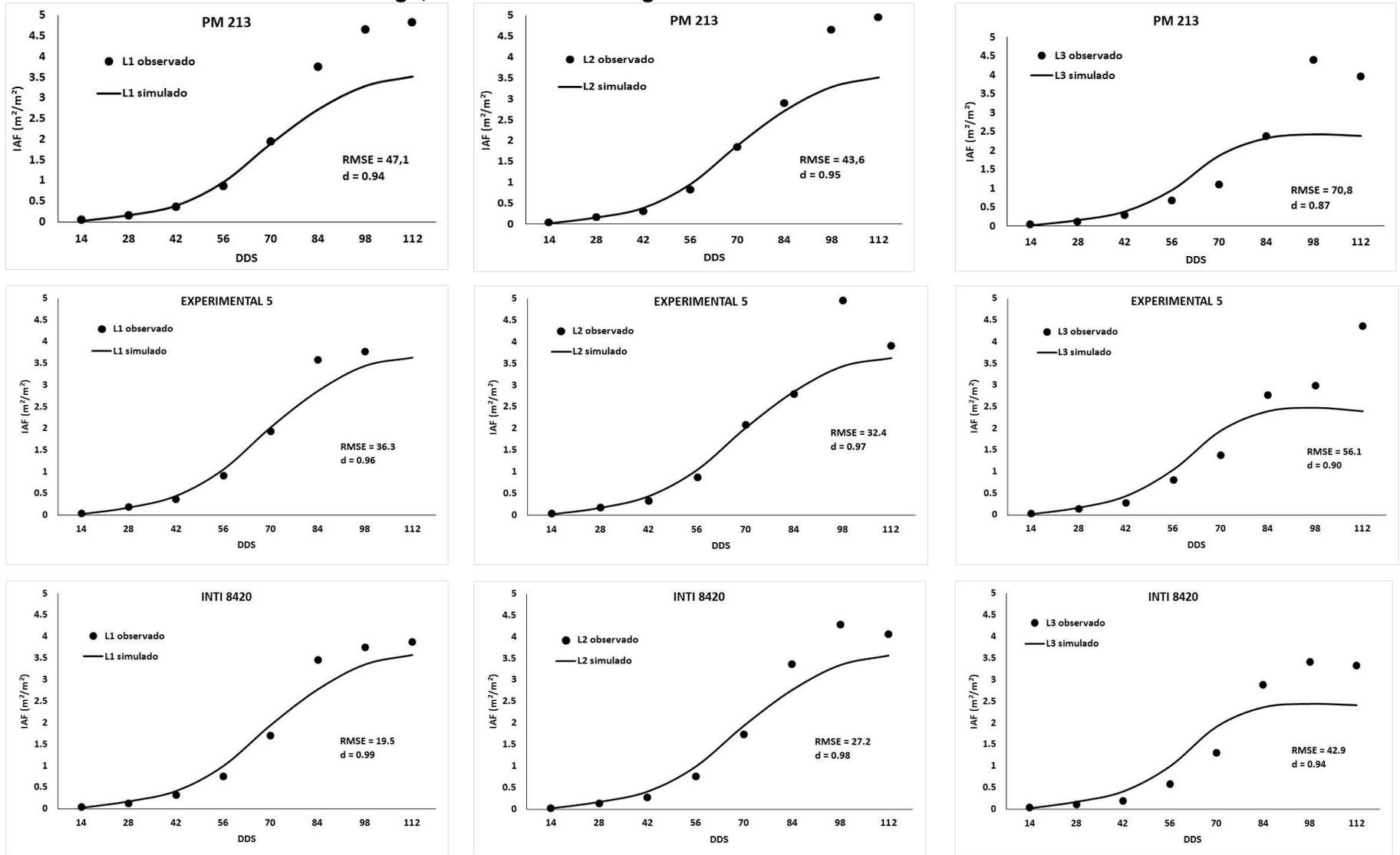


Figura 9. Índice de área foliar observada y simulada con el modelo CERES-Maize de tres híbridos de maíz amarillo duro bajo tres niveles de lámina de riego, en la Universidad Agraria La Molina. 2014-2015.



### **5.2.10 Materia seca de la parte aérea de la planta**

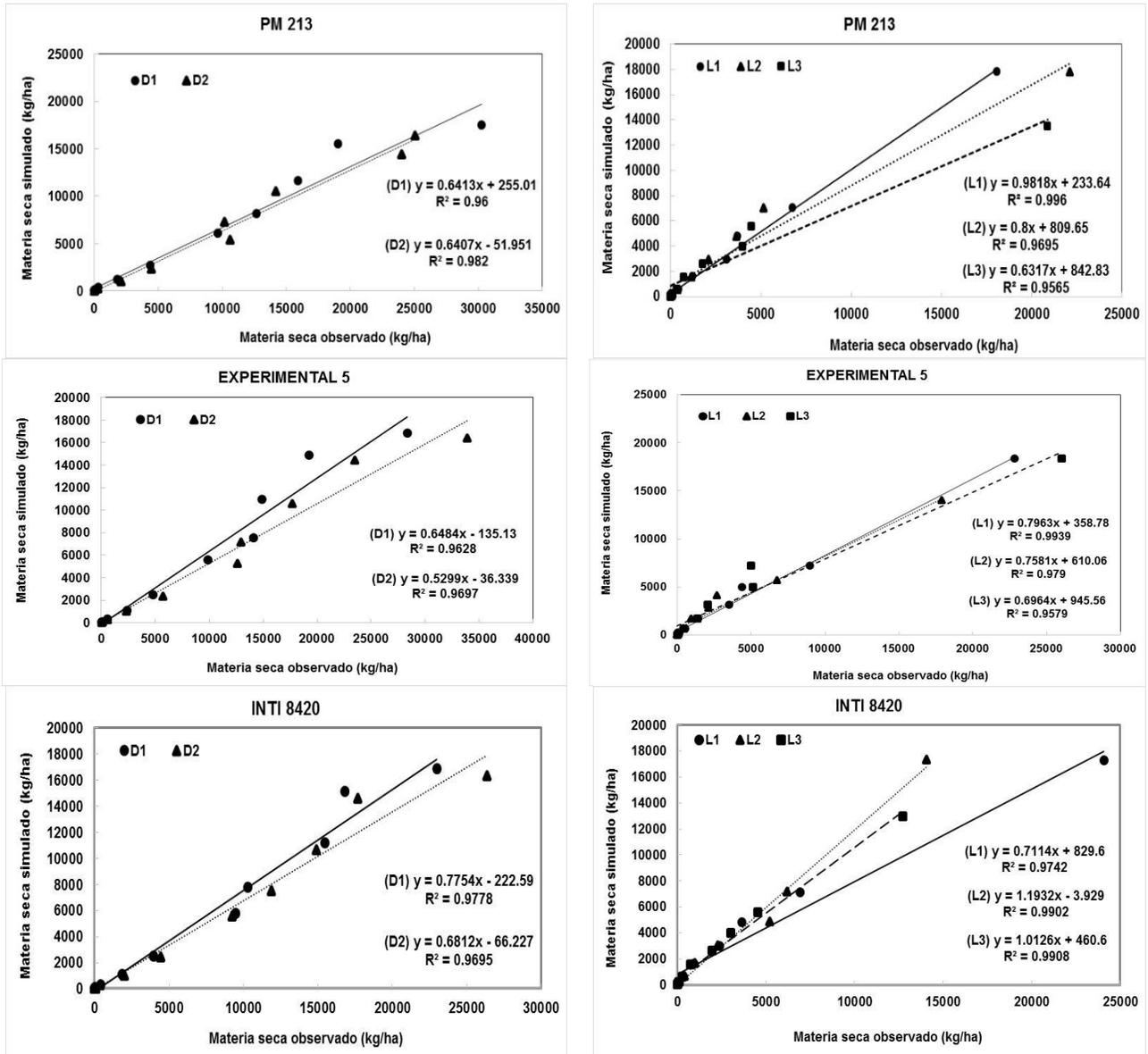
La materia seca de la parte aérea de la planta fue calculada a partir de la base de datos obtenida de diez evaluaciones de peso seco que se hicieron a lo largo de la campaña de cada uno de los ensayos.

En el gráfico de correlación (Figura 10) se observa que para los tres híbridos y bajo todos los tratamientos se obtuvo coeficientes de determinación cercanos a 1. Además se analizó el cuadrado medio del error y el índice de concordancia para cada tratamiento (Figuras 11 y 12).

El híbrido PM-213 presenta valores muy altos de RMSE en todos los tratamientos aplicados, mayores de 40%, excepto en el de L1 (4 705 m<sup>3</sup>/ha) (10.1%). Por su parte, Experimental 5 presentó valores de RMSE muy altos en todos sus tratamientos, excediendo todos el 39%. Finalmente, el análisis estadístico de Inti 8420 arrojó que todos los resultados de RMSE fueron mayores a 30%, excepto por el tratamiento de L3 (2 352 m<sup>3</sup>/ha) en el que este indicador fue de 20.2%. A pesar de ello, los índices de concordancia para todos los casos fueron altos.

Los resultados altos de RMSE indican que el modelo simula deficientemente la materia seca de la parte aérea. Esto podría ser debido a malas mediciones del peso seco en la fase de campo, puesto que en el desarrollo del experimento se tuvo complicaciones con la disponibilidad de estufas y no todas las muestras fueron secadas homogéneamente. De ahí que algunos valores de peso seco podrían estar errados y por ello se obtienen resultados tan altos de RMSE.

Figura 10. Gráfico de correlación de materia seca de la parte aérea observada y simulada con el modelo CERES-Maize de tres híbridos de maíz amarillo, en la Universidad Agraria La Molina. 2014-2015.



**Figura 11. Materia seca de la parte aérea observada y simulada con el modelo CERES-Maize de tres híbridos de maíz amarillo duro conducidos bajo dos densidades de siembra, en la Universidad Agraria La Molina. 2014-2015.**

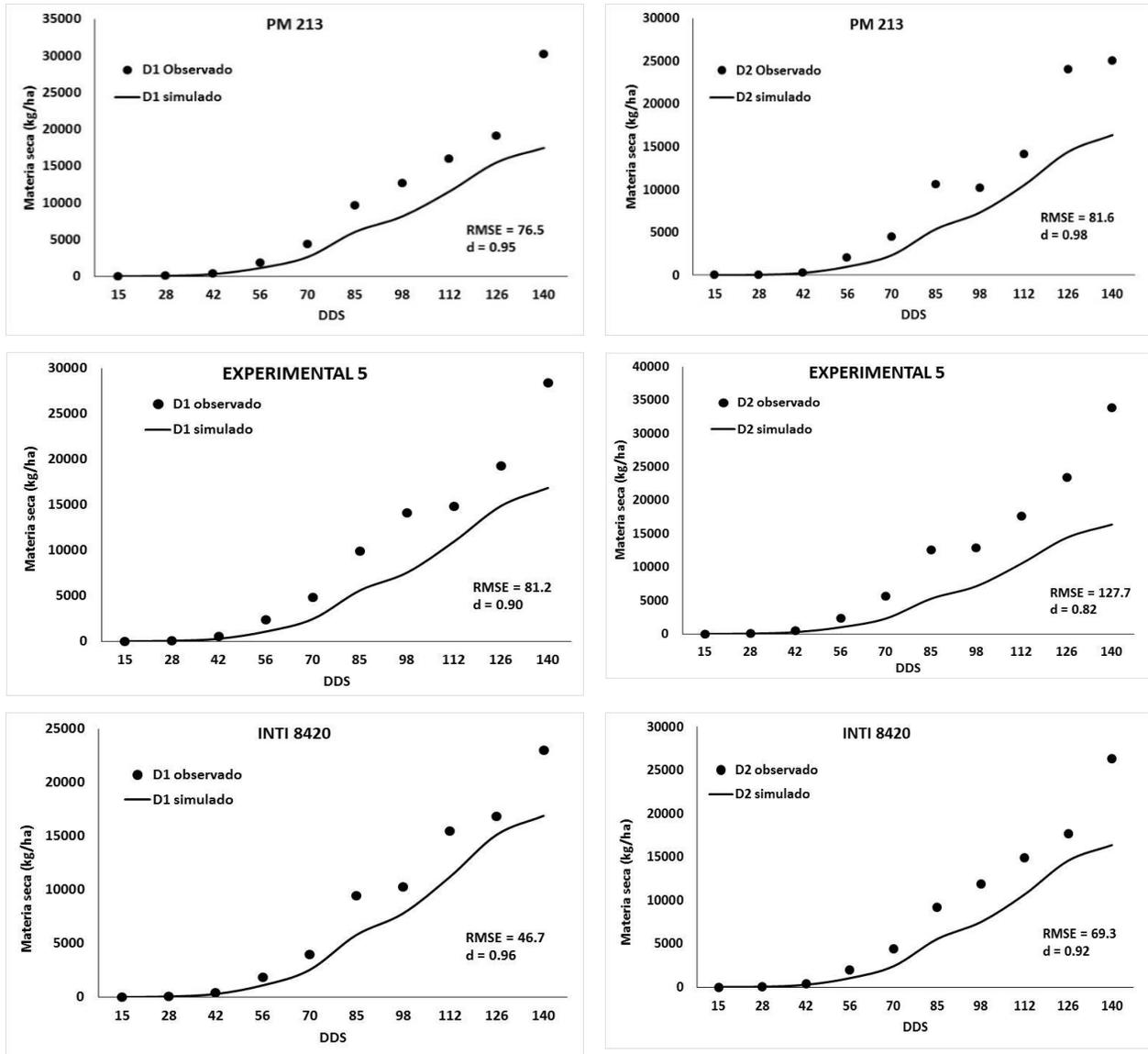
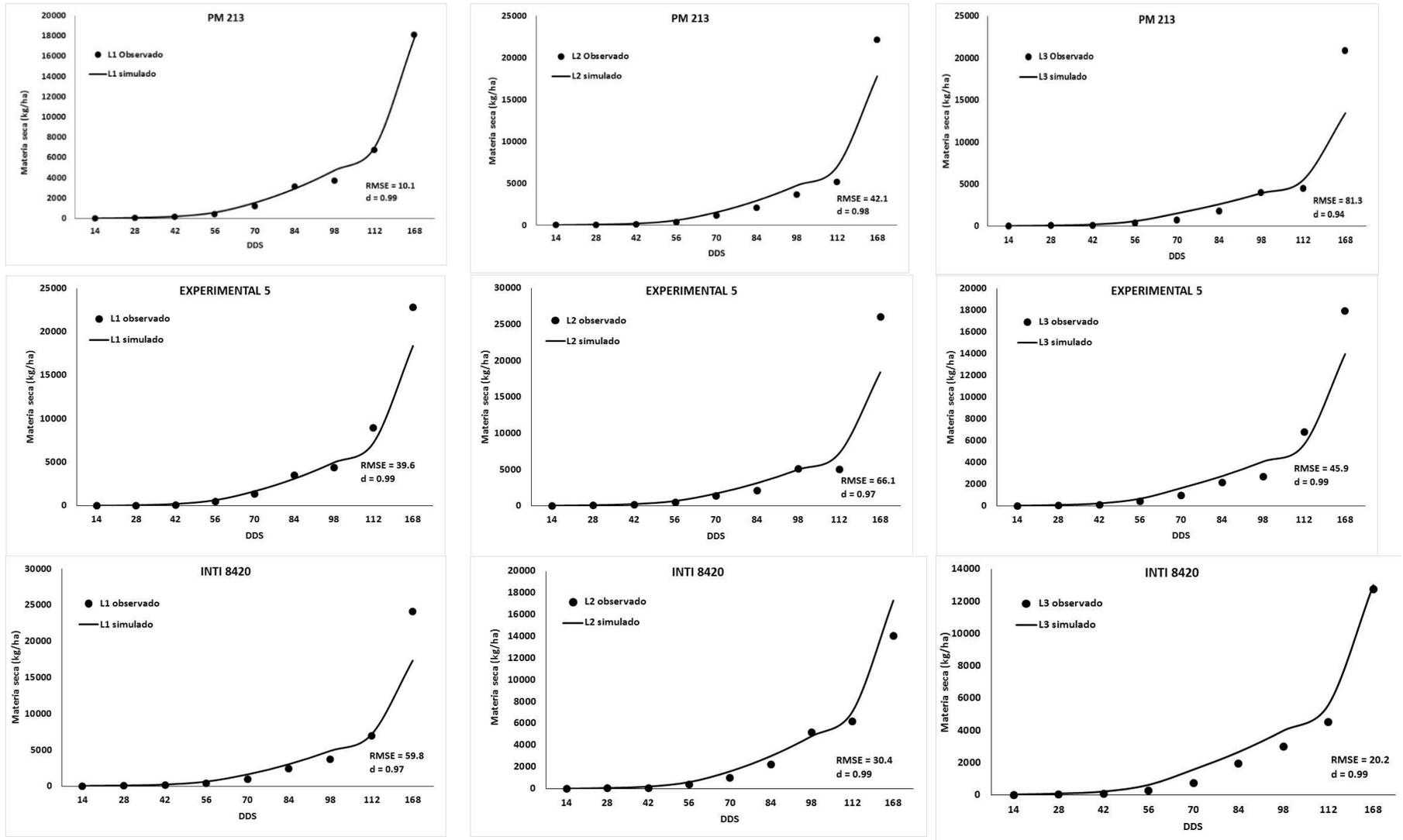


Figura 12. Materia seca de la parte aérea observada y simulada con el modelo CERES-Maize de tres híbridos de maíz amarillo duro bajo tres niveles de lámina de riego, en la Universidad Agraria La Molina. 2014-2015.



## VI. Conclusiones

- La obtención de coeficientes genéticos se realizó mediante la calibración del modelo, que consistió en un proceso iterativo de búsqueda de los valores que produjeran la menor discrepancia entre resultados simulados y observados, lo cual implica que los valores obtenidos tengan algún margen de error.
- Los coeficientes genéticos que determinan el desarrollo fenológico de la planta son P1 y P5 y estos influyen potencialmente en la mayoría de variables que simula el modelo. Esto resulta lógico tomando en consideración que el rendimiento, así como las variables relacionadas con éste, están influenciadas por el comportamiento de la planta durante sus primeros estadios. Mientras que los coeficientes G2 y G3 rigen exclusivamente el comportamiento de la variable rendimiento y aquellas inherentes a ésta. El coeficiente PHINT, influye de manera más directa en el número final de hojas de la planta, y por consiguiente en el rendimiento final de biomasa; sin embargo también se observó que el resto de las variables ya sea de carácter fenológico o de rendimiento, están en mayor o menor grado influenciados por este coeficiente.
- Los coeficientes genéticos hallados para el híbrido PM-213 fueron P1=286, P5=620, G2=942, G3=12.0 y PHINT=45.4. Para Experimental 5 se calibraron los coeficientes P1=286, P5=630, G2=1120, G3=17.3 y PHINT=42.7. Mientras que para el híbrido Inti 8420 se determinó usar los coeficientes P1=286, P5=580, G2=1200, G3=18.1 y PHINT=44.8.
- Durante la validación se estableció que la predicción del modelo fue estadísticamente entre buena y excelente en las siguientes variables: días a la floración masculina, número final de hojas, peso seco de granos y rendimiento. Entre buena y justa para las siguientes variables: emergencia y número de granos por planta. Y entre justa y deficiente para las variables: máximo índice de área foliar y peso seco de la parte aérea a la maduración fisiológica.

- Cuando se realizó la validación del modelo con respecto a la evolución del índice de área foliar y materia seca, desde la época de siembra a la maduración fisiológica, se observó para ambas variables altos coeficientes de determinación ( $r^2$ ) entre lo observado en el campo y lo simulado por el modelo. Sin embargo, cuando determinamos el RMSE% para ambas variables y en cada tratamiento observamos que la performance del modelo en estos casos fue entre justa y deficiente.
- Del RMSE% obtenido se puede concluir que la simulación por parte de CERES-maize fue entre justa y deficiente para la variable materia seca de la parte aérea. Esto podría ser debido a malas mediciones del peso seco en la fase de campo, puesto que en el desarrollo del experimento se tuvo complicaciones con la disponibilidad de estufas y no todas las muestras fueron secadas homogéneamente.

## **VII. Recomendaciones**

- Realizar ensayos de campo complementarios para validar y de ser necesario reajustar los coeficientes genéticos, con información de estos experimentos realizados en diferentes lugares y/o épocas de siembra, con la finalidad de que el modelo realice una predicción más precisa.
- Tomar en cuenta los requerimientos de información que necesita el sistema DSSAT en general, así como el modelo CERES en particular. Esto es información detallada de suelo y clima en diferentes lugares así como varios aspectos relacionados con el cultivo, tales como la cantidad de nitrógeno en el grano, estado de cultivo a la cosecha, entre otros. Ya que a pesar de que lo simulado por CERES-Maize no es exactamente igual a lo observado en campo, se aproxima bastante para algunas variables y se ha demostrado que con los debidos ajustes puede llegar a ser una herramienta útil en la generación y transferencia de tecnología. Por lo tanto se sugiere a la instituciones involucradas en la investigación de este cultivo, como el Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA) y la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), tener en

consideración estos detalles a través de los protocolos de observación fenológica y biométrica para el cultivo de maíz amarillo duro.

- En futuros experimentos sobre la calibración de modelos de simulación de cultivos se debe considerar como prioridad contar con todos los equipos y herramientas necesarias tales como estufas para la determinación de la materia seca de los cultivos evaluados, entre otros.

### **VIII. Referencias**

- Batchelor, WD; Basso, B; Paz, JO. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy* 18:141-158.
- Bert, FE; Laciana, CE; Podestá, GP; Satorre, EH; Menéndez, AN. 2007. Sensitivity of CERES-maize simulated yields to uncertainty in soil properties and daily solar radiation. *Agricultural Systems* 94:41-150.
- Biblioteca DEKALB. 2015. Principales enfermedades: deficiencia de nutrientes en hojas de maíz (en línea). Sinaloa, MX. Consultado 2 feb. 2015. Disponible en <http://www.dekalb.com.mx/>
- Boote, KJ; Jones, JW; Hoogenboom, G. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In Peart, RM; Curry, RB. eds. s.f. *Agricultural systems modelling and simulation*. Marcel Dekker, New York. p. 651-692.
- Boote, KJ; Jones, JW; Pickering, NB. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal* 88: 704-716.
- Boote, KJ; Tollenaar, DM. 1994. Modeling genetic yield potential. In Boote, KJ; Bennett, JM; Sinclair, TR; Paulsen, GM. eds. s.f. *Physiology and determination of crop yield*. ASA-CSSA-SSSA p. 533-565.
- Bowen, W. Experimentos de campo y el arte de los modelos. CIP-Circular VOI 22(3)/23(1), 1997. p 2-5.
- Curso- taller: calibración y validación de modelos de cultivo de maíz (2014, Lima, PE)

- Duncan, WG; Loomis, RS; Williams, WA; Hanau, R. 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities 38: 181-205.
- Hoogenboom, G; Jones, JW; Porter, CH; Wilkens, PW; Boote, KJ; Batchelor, WD; Hunt, LA; Tsuji, GY. 2003. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0: Overview. Universidad de Hawaii, Honolulu, HI. v. 1. 60 p.
- Hume, CJ; Callander, BA. 1990. Agrometeorology and model building. Outlook on Agriculture 19 (1):25-31
- Hunt, LA; Yan, W; McMaster, GS. s.f. Simulating response to temperature. In White, JW. ed. 2001. Modeling Temperature Response in Wheat and Maize Workshop, proceedings. CIMMYT (2001, El Batán, MX). México D.F; MX. p. 23-30.
- Jacobson, BM; Jones, JW; Welch, SW. 1995. Decision support system to assess agronomic, economic, and environmental impacts of soybean and corn management. ASAE no 952696. St. Joseph, MI, US. 17 p.
- Japtap, SS; Mornu, M; Kang, BT. 1993. Simulation of growth, development and yield of maize in the transition zone of Nigeria. Agricultural Systems 41: 215-229.
- Jones, CA; Dyke, PT; Williams, JK; Kiniry, JR; Benson, VW; Griggs, RH. 1991. EPIC: an operational model for evaluation of agricultural sustainability. Agricultural Systems 37:341-350.
- Jones, CA; Kiniry, JR. 1986. CERES-Maize: a simulation model of Maize growth and development. Colleague Sattion, Texas A and M. University Press. 194 p.
- Jones, CA; Luiten, JC. 1998. Simulation of biological processes. In Peart, R; Curry, R.B. (eds). Agricultural systems modelling and simulation. Marcel Dekker, Nueva York, US. p. 19-62.
- Jones, JW; Hoogenboom, G; Porter, CH; Boote, KJ; Batchelor, WD; Hunt, LA; Wilkens, PW; Singh, U; Gijsman, AJ; Ritchie, JT. 2003. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy 18:235—265.
- Keating, BA; Carberry, PS; Hammer, GL; Probert, ME; Robertson, MJ; Holzworth, D; Huth, NI; Hargreaves, JNG; Meinke, H; Hochman, Z; *et al.* 2003. An overview

of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18:267-288.

- Kiniry, JR; Bockholt, AJ. 1998. Maize and sorghum simulations in diverse Texas environments. *Agron. J.* 90: 682-687.
- Kiniry, JR; Williams, JR; Vanderlip, RL; Atwood, JD; Reicosky, DC; Mulliken, J; Cox, WJ; Mascagni, HJ; Hollinger, JR; Wiebold, WJ. 1997. Evaluation of two maize models for nine U.S. locations. *Agron. J.* 89: 421-426.
- León Velarde, CU; Quiroz, R. 1994. Análisis de sistemas agropecuarios: uso de métodos biomatemáticos. CRNMA. Puno, PE.
- Link, J; Graeff, S; Batchelor, WD; Claupein, W. 2006. Evaluating the economic and environmental impact of environmental compensation payment policy under uniform and variable-rate nitrogen management. *Agricultural System* 91:135-153.
- Liu, HL; Yang, JY; He, P; Bai, YL; Jin, JY; Drury, C F; Zhu, YP; Yang, XM; Li, WJ; Xie, JG; Yang, JM, Hoogenboom, G. 2012. Optimizing parameters of CSM-CERES-Maize model to improve simulation performance of maize growth and nitrogen uptake in northeast China. *Journal of Integrative Agriculture* 11(11): 1898-1913.
- Manrique, ChA y Sotomayor, RJ. Rendimientos de híbridos comerciales en la costa norte. 1969. Informativo de Maíz no 18. Programa Cooperativo de Investigaciones de Maíz. Universidad Agraria La Molina. Lima, PE. p. 4 – 5.
- Mastroilli, M; Katerji, N; Ben Nouna, B. 2003. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment: validation of three revised versions. *European Journal of Agronomy* 19(2003): 125-134.
- Miao, Y; Mulla, DJ; Batchelor, WD; Paz, JO; Robert, PC; Wiebers, M. 2006. Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. *Agronomy Journal* 98: 545-553.
- Pang, XP; Grupta, SC; Moncrief, JF; Rosen, CJ; Cheng, HH. 1998. Water quality: evaluation of nitrate leaching potential in Minnesota glacial outwash soils using the CERES-Maize model. *Journal of Environmental Quality* 27:75-85.

- Pang, XP; Letey, J; Wu, L. 1997. Yield and nitrogen uptake prediction by CERES-maize model under semiarid conditions. *Soil Science Society of America Journal* 61: 254-256.
- Pedroza, H; Dicovsky, L. 2006. Sistema de análisis estadístico con SPSS. Eds. E Rodríguez; N Alvarado. Managua, NI. LITONIC. 167 p.
- Popova, Z; Kercheva, M. 2005. CERES model application for increasing preparedness to climate variability in agricultural planning – calibration and validation test. *Physics and Chemistry of the Earth* 30 (1–3):125-133.
- Ritchie JT; Singh, U; Godwin, DC; Bowen, W. 1998. Cereal growth, development and yield. In Tsuji, GY; Hoogenboom, G; Thornton, PK. eds. 2013. *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers. p. 79-97.
- Ritchie, J T. 1991. Wheat phasic development. In Hanks, RJ; Ritchie, JT. eds. s.f. *Modeling plant and soil systems*. Agronomy Monograph 31: 31-54. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, US.
- Royce, FS; Jones, JW; Hansen, JW. 2001. Model-based optimization of crop management for climate forecast applications. *ASAE*. 44:1319-1327.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, PE). 2003. Atlas de energía solar del Perú. Lima, PE. 31 p.
- Singh, U. 1989. A crop growth model for predicting corn (*Zea mays* L.) performance in the tropics. Ph. D. Thesis, University of Hawaii.
- Stöckle, CO; Donatelli, M; Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18:289-307.
- Summerfield, RJ; Roberts, EH. 1987. Effects of illuminance on flowering in long- and short-day grain legumes: a reappraisal and unifying model. In Atherton, JG. ed. s.f. *Manipulation of flowering*. Londres, UK.
- Thornley, JHM; Johnson, JR. 1990. *Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology*. Clarendon Press. Oxford, UK.
- Thorp, KR; DeJonge, KC; Kaleita, AL; Batchelor, WD; Paz, JO. 2008. Methodology for use of DSSAT models for precision agriculture decision support. *Computers and Electronics in Agriculture* 64:276-285.

- Tojo, C; Sentelhas, C; Hoogenboom; G. 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. Sao Paulo, BR. ScienceDirect. 13 p.
- Velázquez, R. 2015. Inti 8420 (entrevista). Lima, PE, SEMPERU S.A.
- Wilkens, P; Singh U. 2001. A code- level analysis for temperature effects in the CERES models. In White, J W. ed. 2001. Modeling Temperature Response in Wheat and Maize Workshop, proceedings. CIMMYT (2001, El Batán, MX). México D.F; MX. p. 1-8.
- Williams, JR. 1995. The EPIC model. In Singh, VP. ed. 1995? Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications 1995:909-1000.
- Willmott,C.J.,Akleson,G.S.,Davis,R.E.,Feddema,J.J.,Klink,K.M.,Legates,D.R.,Odonnell, J., Rowe, C.M., 1985. Statistic for the evaluation and comparison of models.Journal of Geophysical Research. 90, 8995–9005.
- Wit, CT; Brouwer, R; de Vries, FWTP. 1970. The simulation of photosynthetic systems. In Setlik, I. ed. Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Wageningen, NL. p. 47-70.
- Yzarra, W; Villantoy, A; Catacora, E. 2014. Protocolo de observación fenológica y biométrica para los cultivos de maíz, papa, quinua y alcachofa. 2 ed. Lima, PE. 30 p.

## IX. Anexos

**Anexo 1. Análisis de varianza y comparación de medias de las variables agronómicas para tres híbridos de maíz amarillo duro (PM-213, Experimental 5 y Inti 8420) en dos densidades de siembra (D1: 72 917 plantas/ha y D2: 65 972 plantas/ha), en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014-2015.**

Variables agronómicas	Análisis de varianza				Comparación de medias		
	Fuente de variación	GL	Cuadrados	Medios			
Emergencia (DDS)	Bloque	3	0.0	n.s.	H1D1	11	a
	Tratamiento	5	0.0		H1D2	11	a
	Error	15	0.0		H2D1	11	a
	Total	23			H2D2	11	a
					H3D1	11	a
				H3D2	11	a	
	C.V. (%)		0.0		LSD (0.05)	0	
Antesis (DDS)	Bloque	3	1.5	n.s.	H1D1	93.75	a
	Tratamiento	5	0.6		H1D2	93.75	a
	Error	15	0.6		H2D1	93	a
	Total	23			H2D2	93	a
					H3D1	93	a
				H3D2	93	a	
	C.V. (%)		0.8		LSD (0.05)	1.7795	
Madurez fisiológica (DDS)	Bloque	3	7.7	n.s.	H1D1	138.5	a
	Tratamiento	5	9.1		H1D2	137.5	a
	Error	15	4.9		H2D1	140	a
	Total	23			H2D2	138	a
					H3D1	137	a
				H3D2	135.5	a	
	C.V. (%)		1.6		LSD (0.05)	5.097	
Número de hojas	Bloque	3	1.083	**	H1D1	21.125	a
	Tratamiento	5	9.550		H1D2	21.3125	a
	Error	87	0.960		H2D1	21.3125	a
	Total	95			H2D2	21.6875	a
					H3D1	19.9375	b
				H3D2	19.875	b	
	C.V. (%)		4.7		LSD (0.05)	1.0094	
Máximo índice de área foliar	Bloque	3	0.5685	**	H1D1	3.5046	a
	Tratamiento	5	1.6194		H1D2	2.9184	bc
	Error	87	0.1757		H2D1	3.2555	ab
	Total	95			H2D2	2.9211	bc
					H3D1	3.0566	b
				H3D2	2.5768	c	
	C.V. (%)		13.79609		LSD (0.05)	0.432	
Altura de planta (cm)	Bloque	3	4840.113	**	H1D1	230.531	ab
	Tratamiento	5	6924.49635		H1D2	219.75	bc
	Error	87	550.10393		H2D1	246.156	a
	Total	95			H2D2	252.438	a
					H3D1	208.813	bc
				H3D2	199.469	c	
	C.V. (%)		10.4		LSD (0.05)	24.166	
Materia seca de la parte aérea a la antesis (g)	Bloque	1	333333.333	**	H1D1	1221.5	a
	Tratamiento	5	213212.55		H1D2	836.3	b
	Error	41	48896.113		H2D1	1259.2	a
	Total	47			H2D2	1107.5	ab
					H3D1	934	ab
				H3D2	1067.3	ab	
	C.V. (%)		20.6		LSD (0.05)	330.43	
Materia seca de la parte aérea a la madurez fisiológica (g)	Bloque	3	3092.1391	n.s.	H1D1	458.83	a
	Tratamiento	5	25350.5927		H1D2	344.11	a
	Error	39	17498.2901		H2D1	429.71	a
	Total	47			H2D2	465.23	a
					H3D1	348.28	a
				H3D2	361.81	a	
	C.V. (%)		33.0		LSD (0.05)	198.16	
Rendimiento de grano seco (kg/ha)	Bloque	3	34883442.2	n.s.	H1D1	10122	a
	Tratamiento	5	8773064		H1D2	7307	a
	Error	15	8773064.8		H2D1	9859	a
	Total	23			H2D2	10565	a
					H3D1	11651	a
				H3D2	8995	a	
	C.V. (%)		30.3		LSD (0.05)	6789.7	
Número de granos por planta	Bloque	3	219734.6701	**	H1D1	519.2	ab
	Tratamiento	5	115822.9296		H1D2	338	c
	Error	111	11851.722		H2D1	470.76	ab
	Total	119			H2D2	445.78	b
					H3D1	562	a
				H3D2	456.21	b	
	C.V. (%)		23.4		LSD (0.05)	99.84	
Peso seco de un grano (g)	Bloque	3	0.008456	**	H1D1	0.32045	a
	Tratamiento	5	0.003639		H1D2	0.29914	a
	Error	15	0.001324		H2D1	0.34528	a
	Total	23			H2D2	0.34778	a
					H3D1	0.31459	a
				H3D2	0.26725	a	
	C.V. (%)		11.5		LSD (0.05)	0.0837	

DDS: Días después de la siembra  
 GL: Grados de libertad  
 LSD: La mínima diferencia significativa  
 \* : Significativo al 1% de probabilidad de error.  
 \*\* : Significativo al 5% de probabilidad de error.  
 C.V.: Coeficiente de variación

**Anexo 2. Análisis de varianza y comparación de medias de las variables agronómicas para tres híbridos de maíz amarillo duro (PM-213, Experimental 5 y Inti 8420) en tres láminas de riego (L1: 4 705 m<sup>3</sup>/ha, L2: 3 529 m<sup>3</sup>/ha y L3: 2 352 m<sup>3</sup>/ha), en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014.**

Variabes agronómicas	Fuente de variación	GL	Cuadrados	Medios	Comparación de medias		
Emergencia (DDS)	Lámina de riego	2	0.4	n.s.	L1	4	a
	Bloque	3	0.6		L2	4	a
	Bloque*Lamina de riego	6	0.4		L3	4	a
	Híbrido	2	0.3		H1	4	a
	Lámina de riego*híbrido	4	0.1		H2	4	a
	C.V. (%)		11.7		H3	4	a
Antesis (DDS)	Lámina de riego	2	1.0	*	L1	109	a
	Bloque	3	0.2		L2	108	a
	Bloque*Lamina de riego	6	1.5		L3	108	a
	Híbrido	2	35.0		H1	110.6	a
	Lámina de riego*híbrido	4	2.31		H2	107.2	c
	C.V. (%)		1.6		H3	108.9	b
Número de hojas	Lámina de riego	2	0.3	**	L1	17.8	a
	Bloque	3	0.3		L2	17.5	a
	Bloque*Lamina de riego	6	0.1		L3	17.5	a
	Híbrido	2	3.6		H1	17.6	b
	Lámina de riego*híbrido	4	0.1		H2	17	c
	C.V. (%)		2.4		H3	18	a
Máximo índice de área foliar	Lámina de riego	2	2.7	n.s.	L1	4.7	a
	Bloque	3	0.8		L2	5	a
	Bloque*Lamina de riego	6	0.2		L3	4.1	b
	Híbrido	2	2.9		H1	4.8	a
	Lámina de riego*híbrido	4	0.06		H2	4.1	b
	C.V. (%)		15.41		H3	5	a
Altura de planta (cm)	Lámina de riego	2	885	**	L1	183.2	a
	Bloque	3	627		L2	172.4	a
	Bloque*Lamina de riego	6	482		L3	166.1	a
	Híbrido	2	7538		H1	173.5	b
	Lámina de riego*híbrido	4	568		H2	149	c
	C.V. (%)		6.9		H3	199.2	a
Materia seca de la parte aérea a la antesis (g)	Lámina de riego	2	4998	n.s.	L1	121.4	a
	Bloque	3	546		L2	87.5	b
	Bloque*Lamina de riego	6	924		L3	84.7	b
	Híbrido	2	1802		H1	87.6	b
	Lámina de riego*híbrido	4	1028		H2	94.6	ab
	C.V. (%)		26.3		H3	111.4	a
Rendimiento de grano seco (kg/ha)	Lámina de riego	2	2122738	n.s.	L1	6090	a
	Bloque	3	2175506		L2	5452	a
	Bloque*Lamina de riego	6	1665298		L3	5296	a
	Híbrido	2	1578626		H1	6001.5	a
	Lámina de riego*híbrido	4	350127		H2	5283	a
	C.V. (%)		20.6		H3	5554	a
Número de granos por planta	Lámina de riego	2	15172	n.s.	L1	541.4	a
	Bloque	3	20585.5		L2	565.5	a
	Bloque*Lamina de riego	6	5646.6		L3	4958.6	a
	Híbrido	2	28126		H1	583.1	a
	Lámina de riego*híbrido	4	2321.5		H2	533.0	ab
	C.V. (%)		17.14		H3	486.4	b
Peso seco de un grano (g)	Lámina de riego	2	0.0017	*	L1	0.2	a
	Bloque	3	0.00008		L2	0.2	a
	Bloque*Lamina de riego	6	0.0013		L3	0.2	a
	Híbrido	2	0.0023		H1	0.25	b
	Lámina de riego*híbrido	4	0.0012		H2	0.24	b
	C.V. (%)		7.8		H3	0.27	a

DDS: Días después de la siembra

GL: Grados de libertad

\* : Significativo al 1% de probabilidad de error.

\*\* : Significativo al 5% de probabilidad de error.

C.V.: Coeficiente de variación

**Anexo 3. Cronograma de labores agronómicas para tres híbridos de maíz amarillo duro (PM-213, Experimental 5 y Inti 8420) en dos densidades de siembra (D1: 72 917 plantas/ha y D2: 65 972 plantas/ha), en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014-2015.**

<b>Fecha</b>	<b>DDS</b>	<b>Labor</b>
28/08/2014	-18	Riego de machaco
10/09/2014	-5	Deshierbo manual
13/09/2014	-2	Preparación de terreno
15/09/2014	0	Surcado
15/09/2014	0	Siembra directa por golpes
23/09/2014	8	Aplicación de rodenticida
24/09/2014	9	Aplicación de rodenticida
25/09/2014	10	Aplicación de rodenticida
02/10/2014	17	Primer riego
07/10/2014	22	Aplicación de insecticida
10/10/2014	25	Primera fertilización
16/10/2014		Segundo riego
	31	Desahije
17/10/2014	32	Deshierbo manual
21/10/2014	36	Aplicación de insecticida
28/10/2014	43	Aplicación de insecticida
31/10/2014		Segunda fertilización
	46	Cultivada
06/11/2014	52	Tercer Riego
13/11/2014	59	Cuarto Riego
26/11/2014	72	Quinto Riego
11/12/2014	87	Sexto Riego
08/01/2015	115	Sétimo Riego
15/01/2015	122	Octavo Riego
22/01/2015	129	Noveno Riego
26/02/2015	164	Cosecha

DDD: Días después de la siembra

**Anexo 4. Cronograma de labores agronómicas para tres híbridos de maíz amarillo duro (PM-213, Experimental 5 y Inti 8420) en tres láminas de riego (L1: 4 705 m<sup>3</sup>/ha, L2: 3 529 m<sup>3</sup>/ha y L3: 2 352 m<sup>3</sup>/ha), en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014.**

<b>Fecha</b>	<b>DDS</b>	<b>Labor</b>
19/06/2014		Preparación del terreno
20/06/2014	0	Siembra
02/07/2014	12	Resiembra
05/07/2014	15	Aplicación de cebo tóxico
09/07/2014	19	Riego
10/07/2014	20	Desahije
17/07/2014	27	Fertilización
20/07/2014	30	Deshierbo manual
23/07/2014	33	Fertilización
24/07/2014	34	Riego
31/07/2014	41	Control fitosanitario
04/08/2014	45	Fertilización
05/08/2014	46	Riego
07/08/2014	48	Control fitosanitario
14/08/2014	55	Deshierbo manual
19/08/2014	60	Fertilización
21/08/2014	62	Riego
26/08/2014	67	Fertilización
27/08/2014	68	Deshierbo manual
28/08/2014	69	Aplicación de cinc
03/09/2014	75	Aporque
04/09/2014	76	Fertilización
08/09/2014	80	Riego
11/09/2014	83	Fertilización
17/09/2014	89	Deshierbo manual
18/09/2014	90	Riego
25/09/2014	97	Fertilización
30/09/2014	102	Fertilización
02/10/2014	104	Control fitosanitario
03/10/2014	105	Fertilización
09/10/2014	111	Riego
18/10/2014	120	Fertilización
02/11/2014	135	Riego
17/11/2014	150	Riego
02/12/2014	165	Riego
		Cosecha

DDD: Días después de la siembra

**Anexo 5. Cronograma de riego para tres híbridos de maíz amarillo duro (PM-213, Experimental 5 y Inti 8420) en dos densidades de siembra (D1: 72 917 plantas/ha y D2: 65 972 plantas/ha), en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014-2015.**

<b>Riego</b>	<b>Fecha</b>	<b>Lámina de agua aplicada (mm)</b>
Machaco	28/08/2014	36.30
1º	02/10/2014	53.05
2º	16/10/2014	31.08
3º	06/11/2014	71.05
4º	13/11/2014	36.39
5º	26/11/2014	19.96
6º	11/12/2014	55.73
7º	08/01/2015	29.13
8º	15/01/2015	40.88
9º	22/01/2015	30.82
<b>Volumen total (mm)</b>		<b>404.39</b>

**Anexo 6. Cronograma de fertilización para tres híbridos de maíz amarillo duro (PM-213, Experimental 5 y Inti 8420) en dos densidades de siembra (D1: 72 917 plantas/ha y D2: 65 972 plantas/ha), en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014-2015.**

<b>Fecha</b>	<b>DDs</b>	<b>Úrea (kg/ha)</b>	<b>FDA (kg/ha)</b>	<b>KCl (kg/ha)</b>	<b>Guano de islas (kg/ha)</b>
10-oct	25	200	200	100	0
31-oct	46	200	0	100	200

**Anexo 7. Cronograma de riego para tres híbridos de maíz amarillo duro (PM-213, Experimental 5 y Inti 8420) en tres láminas de riego (L1: 4 705 m<sup>3</sup>/ha, L2: 3 529 m<sup>3</sup>/ha y L3: 2 352 m<sup>3</sup>/ha), en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014.**

<b>DDS</b>	<b>Kc</b>	<b>Eo(mm/dia)</b>	<b>Etc(mm/dia)</b>	<b>Neto (mm/dia)</b>	<b>L1 (mm)</b>	<b>L2 (mm)</b>	<b>L3 (mm)</b>
15	0.44	1.90	0.84	12.54	19.67	14.75	9.84
30	0.60	1.82	1.09	16.38	25.69	19.27	12.85
45	0.68	1.75	1.19	17.85	28.00	21.00	14.00
60	0.72	1.90	1.37	20.52	32.19	24.14	16.09
75	0.78	1.95	1.52	22.81	35.79	26.84	17.89
90	0.88	2.20	1.94	29.04	45.55	34.17	22.78
105	1.12	2.60	2.91	43.68	68.52	51.39	34.26
120	1.18	3.00	3.54	53.10	83.29	62.47	41.65
135	0.95	3.45	3.28	49.16	77.72	57.84	38.86
150	0.70	3.70	2.59	38.85	60.94	45.71	30.47
<b>Volumen total aplicado (mm)</b>				<b>309.93</b>	<b>477.36</b>	<b>366.57</b>	<b>238.68</b>

**Anexo 8. Cronograma de fertilización para tres híbridos de maíz amarillo duro (PM-213, Experimental 5 y Inti 8420) en tres láminas de riego (L1: 4 705 m<sup>3</sup>/ha, L2: 3 529 m<sup>3</sup>/ha y L3: 2 352 m<sup>3</sup>/ha), en la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014.**

<b>Fecha</b>	<b>DDs</b>	<b>NO<sub>3</sub>NH<sub>4</sub> (kg/ha)</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (l/ha)</b>	<b>NO<sub>3</sub>K (kg/ha)</b>
10-jul	20		22.32	
17-jul	27	33.65	22.32	
24-jul	34	33.65	22.32	
31-jul	41	33.65	22.32	
07-ago	48	33.65		36.37
14-ago	55	33.65		36.37
21-ago	62	33.65		36.37
28-ago	69	33.65		36.37
04-sep	76	33.65		36.37
11-sep	83	33.65		36.37
18-sep	90	33.65		36.37
25-sep	97			36.37
02-oct	104			36.37
09-oct	111			36.37