

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE.**



**ESTIMACION DE LOS DIAS GRADO EN EL CULTIVO DE PAPA
MEDIANTE CINCO METODOS**

POR:

ANGEL EDWY ZÚÑIGA CÁRDENAS

TESIS

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

INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACIÓN

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2007

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

**ESTIMACION DE LOS DIAS GRADO EN EL CULTIVO DE PAPA
MEDIANTE CINCO METODOS**

TESIS

Presentada por:

ANGEL EDWY ZÚÑIGA CÁRDENAS

Que somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito parcial
para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR:

PRESIDENTE DEL JURADO

Dr. Alejandro Zermeño González

Sinodal

Sinodal

Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez

M.C. Gregorio Briones Sánchez

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Dr. Raúl Rodríguez García

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México. Diciembre 2007.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

**ESTIMACION DE LOS DIAS GRADO EN EL CULTIVO DE PAPA
MEDIANTE CINCO METODOS**

TESIS

Presentada por:

ANGEL EDWY ZÚÑIGA CÁRDENAS

Que somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito parcial
para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR:

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez

ASESOR

ASESOR

Dr. Alejandro Zermeño González

M.C. Gregorio Briones Sánchez

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Dr. Raúl Rodríguez García

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Diciembre 2007.

DEDICATORIA.

A DIOS.

Por darme la vida, salud y la oportunidad de terminar la carrera. También por darme una familia muy unida y con los pies en la tierra.

A MIS PADRES.

Antonio Zúñiga Lara e Isabel Cárdenas Coello.

Gracias padres hermosos por darme esa oportunidad de seguir adelante, por todo el apoyo y comprensión que me han otorgado, con el firme propósito de que mi vida se conduzca por el camino del triunfo y de la verdad, por sus consejos, por hacerme de mí una persona amable, enseñándome a sonreírle la vida, por preocuparse cada vez que viajaba, por todo esto les estoy muy agradecido. A ustedes les dedico esta Tesis, que dios los bendiga.

A MIS HERMANOS.

José Antonio, gracias por todos los consejos que me brindaste, para seguir adelante, que nunca me diera por vencido, que diosito te bendiga. También para felicitarte que muy pronto serás papa.

Carlitos, a ti por ser el mas pequeño de la familia y por compartir muy buenos momentos a veces de alegría y otras de tristeza, también por ser la alegría de la casa, gracias hermanito. Estudia mucho y échale ganas a la escuela.

A MIS AMIGOS.

Maicol, Carlos Alberto, Jorge, Melchor, Tonisho, Chegue, Eduardo, Victalino, Celia, Bety, Saira. Que hemos sido participe de tristezas y alegrías. He de agradecerles enormemente su sincera amistad.

AGRADECIMIENTOS

A MI ALMA TERRA MATER.

Gracias por ser mi casa durante mi estancia, que siempre te llevare muy en alto y muy orgulloso de ser buitre y buitre de la “Antonio Narro”.

AL Dr. Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez.

Gracias por el apoyo que me brindo al concluir la presente tesis, por su paciencia y comprensión; usted me dijo en una ocasión que no le agradeciera, que quería ver resultados, espero y sea un buen resultado. De ante mano le estoy muy agradecido y dios lo bendiga.

AL Dr. Alejandro Zermeño González

Por se mi maestro durante mi formación profesional y por la culminación de la tesis. Gracias por su paciencia, que mi diosito lo bendiga.

AL M.C. Gregorio Briones Sánchez

Por darme asesorías antes de iniciar la tesis, por ser una persona sencilla y por ser mí maestro durante la carrera, también por las revisiones del presente trabajo. Gracias.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
INDICE DE CONTENIDO.....	iii
INDICE DE CUADROS.....	iv
INDICE DEL APENDICE	v
RESUMEN.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos.....	3
Hipótesis.....	3
REVISION DE LITERATURA.....	4
Características generales del cultivo de papa.....	4
Etapas en el desarrollo de la planta y partición de asimilados.....	4
Formación del rendimiento en el cultivo.....	6
Requerimientos del cultivo de papa.....	8
Humedad.....	8
Luz.....	8
Temperatura.....	8
Heladas.....	9
Fotoperíodo.....	9
Radiación incidente.....	10
Disponibilidad de agua.....	10
Nitrógeno.....	10
Requerimientos de agua para el cultivo de papa.....	11
Concepto de unidades calor.....	13
Días grado.....	14
Programación del riego en tiempo real.....	14

INDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Requerimientos de temperatura del aire en el cultivo de papa a través de su crecimiento.....	16
Cuadro 2. Etapas fenológicas de la papa y su duración durante el ciclo P-V 2006, en Emiliano Zapata, Arteaga, Coahuila.....	21
Cuadro 3. Comparación de métodos para estimar días grado en la etapa de siembra a emergencia del cultivo de papa.....	22
Cuadro 4. Comparación de métodos para estimar días grado en la etapa de emergencia a estolonización del cultivo de papa.....	22
Cuadro 5. Comparación de métodos para estimar días grado en la etapa de estolinización a tuberización del cultivo de papa.....	23
Cuadro 6. Comparación de métodos para estimar días grado en la etapa de tuberización a madurez fisiológica del cultivo de papa.	24
Cuadro 7. Comparación de métodos para estimar días grado en el cultivo de papa.....	24

INDICE DEL APENDICE

	Página
Cuadro 1A. Base de datos para estimar días grado en el cultivo de papa.....	33
Cuadro 2A. Análisis de varianza de los tratamientos en el periodo de siembra a emergencia del cultivo de papa.....	36
Cuadro 3A. Análisis de varianza de los tratamientos en el periodo de emergencia a estolonización del cultivo de papa.....	36
Cuadro 4A. Análisis de varianza de los tratamientos en el periodo de estolonización a tuberización del cultivo de papa.....	36
Cuadro 5A. Análisis de varianza de los tratamientos en el periodo de tuberización a madurez fisiológica del cultivo de papa.....	37
Cuadro 6A. Análisis de varianza de los tratamientos en el periodo de siembra a madurez fisiológica del cultivo de papa.....	37

RESUMEN

La continua actualización de la tecnología en el uso eficiente del agua permite disponer de estaciones agroclimáticas automáticas y su utilización en la generación de programas de riego en tiempo real. Los días grado (Di) son de utilidad en la estimación de la evapotranspiración potencial del cultivo (Etp), de la profundidad de raíces (pr), del abatimiento de agua en el suelo (f) y del coeficiente de desarrollo del cultivo (kc), pero existen varios métodos para su valoración, el objetivo del estudio fue evaluar métodos para estimar los Di en las etapas de crecimiento del cultivo de papa. Se evaluaron cinco métodos: exponencial, fisiológico, residual, seno modificado y gradual en cuatro etapas de crecimiento: de siembra (S) a emergencia (E), de E a desarrollo vegetativo (DV), de DV a estolonización (Es) y de Es a tuberización (T). El análisis se realizó en un diseño completamente al azar y las variables fueron días grado promedio ($Di\mu$), días grado acumulados a cada etapa y al final del ciclo ($Di\text{ acum}$) y desviación porcentual del promedio (DPP). En las dos primeras etapas (S a E y E a DV), los métodos residuales, graduales y fisiológicos son similares en la estimación de los $Di\mu$ en la etapa DV a Es, los métodos evaluados son diferentes estadísticamente y en la última etapa (Es a T), los métodos residual, seno gradual son similares significativamente. El Di acumulado presentó la menor DPP con los métodos residual, seno y gradual. Se recomienda utilizar los métodos residual y gradual por su menor rigor matemático, además que estos ya han sido utilizados con éxito en la generación de programas de riego en tiempo real para el cultivo de papa.

Palabras clave: Papa, programas de riego, días grado, automatización.

I. INTRODUCCIÓN

En el presente la agricultura más productiva del Centro y Norte de México depende de la irrigación y la mayoría de la producción de hortalizas utiliza las reservas del agua subterránea, y estas se encuentran con severas restricciones debido a que son mayores las extracciones que las recargas naturales de los mantos freáticos (Chávez, 1998).

La disponibilidad de agua para el riego de los cultivos en la zona norte del país es cada vez menor, esto debido a que el agua se utiliza para fines industriales, para el suministro a la creciente población en las zonas urbanas, a un abatimiento de los acuíferos y actualmente a la falta de lluvias debido al cambio climático global (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Los datos climáticos de una región son de gran utilidad en las diversas actividades agropecuarias. Por ejemplo, para el diseño de un invernadero se requiere conocer la evolución de la temperatura y la humedad del aire en sus valores medios y extremos a nivel diario o a nivel estacional. Además, es necesario conocer el período libre de heladas, la insolación, la intensidad de la radiación solar, la duración del día, el régimen de los vientos (velocidad y dirección) y los vientos dominantes. El conocimiento del clima de una región permite también cuantificar sus recursos climáticos con el fin de determinar los cultivos más aptos para esa región, definir las mejores fechas de siembra y cosecha, así como programar las labores de cultivo y la aplicación de los riegos.

Los requerimientos de riego de los cultivos varían, temporal y espacialmente, en función del clima, del manejo, de la fase y de la variedad del cultivo, por lo que su cálculo debe ser local (Doorenbos y Pruitt, 1977). La implantación de un programa de uso eficiente del riego requiere certidumbre del cálculo de los requerimientos de riego.

La temperatura es considerada como la variable esencial del clima, por lo que es el elemento climático que más se estudia y del que mejor se conocen sus relaciones con el desarrollo de las plantas. Una forma de analizar el efecto de la temperatura sobre el desarrollo de los cultivos es a través de índices térmicos más comúnmente llamados grados-día. Estos índices han servido para caracterizar las fases fenológicas de diversos cultivos como manzano (Valentini *et al.*, 2001), melón (Baker y Reddy, 2001) y cártamo (Villa y Catalán, 1992) y son por lo tanto útiles para predecir el desarrollo de los cultivos (Kramer, 1994; Ritchie y NeSmith. 1991).

Por tal motivo el concepto de eficiencia en el uso del agua en los cultivos toma una verdadera importancia y esto se ve reflejado en la generación en México de programas de riego en tiempo real utilizando estaciones agroclimáticas automáticas para los cultivos de maíz (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006) y papa (Covarrubias *et al.*, 2006) entre otros.

La papa (*Solanum tuberosum L.*) es uno de los cultivos más valiosos para la humanidad. En la mayoría de los países se siembra en superficies extensas, y por el volumen de producción, ocupa el cuarto lugar a nivel mundial, después del arroz, trigo y maíz. Aunado con estos cereales, tiene gran relevancia en la dieta alimentaria de la población mundial en constante crecimiento. Siendo la papa un cultivo con altos costos de producción y muy sensible al estrés hídrico, un buen manejo del riego debe considerar no sólo su eficiencia y uniformidad, sino también su cantidad y oportunidad.

Objetivos.

Los objetivos de esta investigación fueron:

- Estimar los días-grado calor en el cultivo de la papa mediante cinco métodos.
- Evaluar los días-grado acumulados durante las etapas de desarrollo del cultivo.
- Determinar el método más representativo para estimar los días grado en el cultivo de papa.

Hipótesis

H_0 : Los métodos utilizados estiman la misma cantidad de días grado en cada etapa de desarrollo del cultivo de papa

H_a . Los métodos evaluados no estiman los mismos días grado en el cultivo de papa.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Características generales del cultivo de papa

La papa pertenece a la familia de las solanáceas, al igual que el tomate. Es sensible a heladas y crece bien en climas templados, con temperaturas entre 15° y 27 °C. Requiere una estación de crecimiento con una longitud mínima de 3 a 4 meses, en la cual las temperaturas no sean demasiado altas (> 30 °C) ni demasiado bajas (<5 °C). En las regiones frías se la cultiva durante el verano y en el invierno en las regiones cálidas. En algunas zonas hay más de una estación de crecimiento al año, generalmente primavera y otoño, en la cual el cultivo crece y produce bien. El clima de la zona dónde se originó la papa se caracteriza por tener inviernos fríos (con temperaturas por debajo de 0 °C), y veranos frescos con alta radiación incidente (Aldabe Luís y Dogliotti Santiago. 2000).

El órgano consumido es el tubérculo. Este es un órgano subterráneo de almacenamiento de reservas y resistencia. La planta, en las condiciones climáticas del centro de origen, lo forma cuando percibe del ambiente las señales de que se aproxima el invierno o la estación desfavorable para el crecimiento (fotoperíodo decreciente). Los tubérculos sobreviven en dormancia durante el invierno y en la primavera, cuando las condiciones de temperatura son favorables para el crecimiento, brotan originando una nueva planta.

Etapas en el desarrollo de la planta y partición de asimilados

Del punto de vista del destino o uso de los asimilados disponibles para el crecimiento podemos distinguir tres etapas bien diferenciadas en el ciclo del cultivo de papa (Kooman, 1995).

Etapas 1 = Desde la siembra hasta el inicio de la tuberización (tubérculos diferenciados y con 1g o más de materia seca por m²). En esta etapa los asimilados se destinan al crecimiento de hojas, tallos, raíces y hacia el final de la etapa también estolones. Desde la plantación y hasta que cada planta tiene

de 200-300 cm² de área foliar la fuente principal de asimilados son los almacenados en el tubérculo semilla, y luego, por el resto del ciclo del cultivo, los producidos por el área foliar y tallos aéreos.

Etapa 2 = Desde el inicio de la tuberización hasta el fin del crecimiento del follaje. En esta etapa los asimilados disponibles se comparten entre el crecimiento del área foliar y el crecimiento de los tubérculos y estolones. A lo largo de esta segunda etapa, en la medida que se inician cada vez más tubérculos y estos aumentan su fuerza de fosa, una porción creciente de los asimilados disponibles se destina a estos en detrimento del crecimiento del follaje. Primero se detiene la ramificación y la aparición de hojas nuevas y al final de la etapa cesa totalmente el crecimiento del follaje.

Etapa 3 = Desde el fin del crecimiento del follaje hasta el fin del crecimiento del cultivo. El final del crecimiento del cultivo ocurre por la senescencia del follaje. El área foliar en esta etapa empieza a disminuir porque no hay desarrollo de hojas nuevas, las hojas más viejas van muriendo y el área foliar en su conjunto va gradualmente bajando su eficiencia fotosintética hasta que esta no es suficiente para mantener el crecimiento de los tubérculos. En esta etapa, entonces, todos los asimilados disponibles se destinan al crecimiento de los tubérculos.

Con la finalidad de un muestreo para determinar los efectos de nutrición y sanidad, Covarrubias *et al.* (2005 y 2007), definen las siguientes etapas fenológicas del cultivo de papa:

- 1) Siembra (S) cuando el tubérculo es colocado en el suelo previamente abierto y se aplican los agroquímicos necesarios para su producción para después cubrir con el suelo.
- 2) Emergencia (E) cuando en el 50 por ciento de la población han salido las dos hojas principales y ocurre de 15 a 22 días después de siembra.

- 3) Crecimiento vegetativo (CV) a los 25 días después de emergencia (dde), cuando el cultivo tuvo de 8 a 10 hojas.
- 4) Inicio de tuberización (IT), a los 45 dde, cuando la parte final del estolón empezó a desarrollarse en el tubérculo.
- 5) Inicio de crecimiento del tubérculo (CT), a los 60 dde, cuando el tubérculo inició su crecimiento, por lo que su peso es menor respecto a la suma del follaje y la raíz.
- 6) Desarrollo del tubérculo (DT), a los 80 dde, cuando el tubérculo alcanzó su máximo crecimiento y su peso es mayor que la suma del follaje y la raíz.
- 7) Madurez fisiológica (MF).- 100 a 110 dde, cuando el contenido máximo de materia seca es alcanzado, inicia la senescencia y la piel del tubérculo tiende a engrosar.
- 8) Cosecha del tubérculo (C), de 15 a 20 días después de madurez fisiológica cuando la cutícula ha engrosado y no se remueve aún cuando se fricciona con los dedos de la mano al frotarla.

Formación del rendimiento en el cultivo.

El rendimiento final de un cultivo de papa depende de la tasa de crecimiento promedio y del largo del período de crecimiento de los tubérculos. La proporción más importante del crecimiento de estos se da en la etapa 3, en la que prácticamente todos los asimilados disponibles son utilizados para el crecimiento de los tubérculos. La tasa de crecimiento de los tubérculos (TAN) en esta etapa depende sólo de la capacidad de fuente del cultivo o sea de la radiación solar interceptada y de la eficiencia con que el área foliar transforme la radiación en azúcares simples. La disponibilidad de agua, nutrientes, radiación y CO₂, y la edad del follaje determina la eficiencia de uso de la luz. El índice de área foliar (IAF) determina la cantidad de radiación interceptada por el cultivo. La duración de la tercera etapa depende directamente de la duración de la cobertura del suelo por un follaje activo, o sea, de la duración del área foliar (DAF). La DAF está afectada por factores del ambiente como la intensidad de

radiación, la temperatura y la disponibilidad de agua y nutrientes, pero en condiciones ambientales óptimas lo que determina la DAF en la etapa 3 es la cantidad de biomasa acumulada en el follaje en las etapas anteriores. Cuanto mayor sea esa cantidad de biomasa y el IAF al que se llega al final de la etapa 2, mayor va a ser la cantidad de radiación interceptada en la etapa 3, bajo condiciones ambientales adecuadas al crecimiento, y por lo tanto mayor el potencial de rendimiento del cultivo.

La cantidad de biomasa acumulada en el follaje es función de la cantidad de hojas que se diferencien y del tamaño promedio que alcancen dichas hojas. De acuerdo al modelo de crecimiento de la planta de papa, la cantidad de hojas que se diferencian en la planta está directamente relacionada al número de ramificaciones que se alcanzan. La diferenciación de ramas y hojas en la planta de papa ocurre en la etapa 1, antes de la iniciación de la tuberización. Por lo tanto, la duración de la etapa 1 es un factor determinante del número de niveles de ramificación y por lo tanto del número de hojas formadas por planta.

El largo del período de plantación a inicio de tuberización (Etapa 1) influye en el largo de las siguientes etapas y por lo tanto en el largo total del ciclo (Kooman *et al.*, 1996; Biemond, 1995). Esta influencia se debe a que en la etapa inicial es cuando se diferencian los tallos y las hojas, y por lo tanto se determina el número potencial de éstas. Estudiar los factores del ambiente y de la planta que afectan la duración de este período equivale a estudiar cuales son los factores que influyen en el inicio de la tuberización, ya que es este fenómeno el que marca el fin de la primera etapa.

Kooman *et al.*, (1996) encontraron que cuando se alarga un día la duración de la etapa 1, se alarga un día la duración de las etapas 2 y 3. Por lo tanto alargar un día la duración del período previo al inicio de la tuberización resultó en 3 días más de duración del ciclo de crecimiento del cultivo. En situaciones muy diversas de clima y variedades estos autores encontraron que la variable que

explicó en mayor medida las diferencias de rendimiento entre cultivos fue el largo de ciclo.

Requerimientos del cultivo de papa

Humedad.

La humedad relativa moderada es un factor muy importante para el éxito del cultivo. La humedad excesiva en el momento de la germinación del tubérculo y en el periodo desde la aparición de las flores hasta a la maduración del tubérculo resulta nociva. Una humedad ambiental excesivamente alta favorece el ataque de mildiu (Burton, W.G. 1989).

Luz.

La luz tiene una incidencia directa sobre el fotoperiodo, ya que induce la tuberización. Los fotoperiodos cortos son más favorables a la tuberización y los largos inducen el crecimiento, además de influir sobre el rendimiento final de la cosecha.

En las zonas de clima cálido se emplean cultivares con fotoperiodos críticos, comprendidos entre 13 y 16 horas. La intensidad luminosa además de influir sobre la actividad fotosintética, favorece la floración y fructificación (Aldabe, L. y Aldabe, R. 1976).

Temperatura

Se trata de una planta de clima templado-frío, siendo las temperaturas más favorables para su cultivo las que están en torno a 13 y 18°C. Al efectuar la plantación la temperatura del suelo debe ser superior a los 7°C, con unas

temperaturas nocturnas relativamente frescas (Kooman, P.L., Haverkort, A.J., 1994).

El frío excesivo perjudica especialmente la papa, ya que los tubérculos quedan pequeños y sin desarrollar. Si la temperatura es demasiado elevada afecta a la formación de los tubérculos y favorece el desarrollo de plagas y enfermedades.

En el inicio de la tuberización, el otro factor que juega un rol fundamental además de la sensibilidad al fotoperíodo dada por el Fitocromo B, es la disponibilidad de asimilados o azúcares simples en la planta para el inicio de los tubérculos. Al igual que la aparición del primer racimo floral en la planta de tomate, el inicio de la tuberización en la planta de papa está afectado por la relación fuente/demanda. Como la temperatura es uno de los factores fundamentales que afecta esta relación, tiene una gran influencia en la determinación del momento de inicio de la tuberización.

Heladas

Es un cultivo bastante sensible a las heladas tardías, ya que produce un retraso y disminución de la producción. Si la temperatura es de 0°C la planta se hiela, acaba muriendo aunque puede llegar a rebrotar. Los tubérculos sufren el riesgo de helarse en el momento en que las temperaturas sean inferiores a -2°C (Moorby and Milthorp, 1983).

Fotoperiodo

La papa es una planta de día corto. En su lugar de origen, el acortamiento de los días es la señal que anuncia la llegada del período frío, inadecuado para el crecimiento. Ante este estímulo la planta inicia la formación de sus órganos de almacenamiento y resistencia o sea los tubérculos. A través de la domesticación y la adaptación a condiciones de climas muy diversos, el hombre fue desarrollando numerosas variedades de papa con diferencias grandes en cuanto a la respuesta al fotoperíodo. Desde variedades casi insensibles a este

estímulo hasta variedades muy exigentes en fotoperíodo para iniciar la tuberización.

La percepción del fotoperíodo por parte de la planta ocurre en la hoja y de alguna manera esta señal debe ser transmitida a los estolones debajo del suelo, donde ocurrirá la formación de los tubérculos. Se ha demostrado que tal señal es transmitida a través de injertos. Injertos de hojas de plantas de papa que estaban inducidas a tuberizar tuvieron efectos inductores sobre lotes no inducidos, aún cuando luego del injerto estos ellos fueron mantenidos en condiciones no inductoras. La naturaleza de esta señal es probablemente hormonal. Se mueve a través del floema tanto acrópetala como basipetala.

Radiación incidente

En la medida que una alta disponibilidad de asimilados promueve la tuberización, condiciones de alta luminosidad favorecen el inicio de la tuberización en plantas de papa, a igualdad de otros factores ambientales.

Un estrés hídrico moderado durante la etapa de expansión del follaje (etapas 1 y 2 del ciclo del cultivo de papa), frenan el crecimiento del follaje y favorecen la partición de asimilados hacia el crecimiento de los tubérculos, sobre todo cuando ya existen tubérculos iniciados en la planta. Este efecto del estrés hídrico puede interpretarse como un adelantamiento del fin del crecimiento del follaje a favor de la partición a los tubérculos. Esto puede resultar en un acortamiento del ciclo del cultivo.

Disponibilidad de Agua.

La papa es un cultivo muy exigente en agua, aunque un exceso reduce el porcentaje en fécula y favorece el desarrollo de enfermedades. Desde la siembra, el estado hídrico del suelo tiene influencia sobre toda la evolución del cultivo.

Las alternancias de períodos secos y húmedos dan lugar a modificaciones en la velocidad de engrosamiento de los tubérculos, ya que son el origen de ciertos defectos como: grietas, surcos, estrechamientos, etc.

Antes de la tuberización un ligero déficit hídrico favorece el desarrollo de las raíces. Durante el periodo de tuberización las necesidades hídricas pueden llegar hasta 80 metros cúbicos por hectárea y día. Generalmente el método de riego empleado en el cultivo de la papa es el de aspersión con instalaciones móviles, aspersores de baja presión son los más recomendados ya que su gasto y potencia de bombeo son mínimos y el riego es de calidad (Varas Bordeu Edmundo 2000).

Nitrógeno

Alta disponibilidad de N aumenta la duración del área foliar (DAF) o cobertura del suelo por el cultivo de papa, principalmente a través de una tasa más alta de aparición de hojas (ramificación) y de expansión del área foliar (Vos, 1994; Biemond, 1996).

A mayor disponibilidad de N, se produce un mayor número de ramificaciones del tallo principal, y por lo tanto se diferencia un mayor número de hojas (Vos y Biemond, 1992). La longevidad de las hojas se ve afectada por la disponibilidad de N, pero en menor medida. La longevidad de las hojas disminuye cuando ocurren déficit severos de N (Vos, 1994).

Vos y Biemond (1992) encontraron que a dosis altas de N la longevidad de las hojas más jóvenes (las que están en la parte más alta de la canopia), aumenta en 20 días respecto a plantas que recibieron la mitad de la dosis de N. La disponibilidad de N también afecta el crecimiento de las hojas, a través de tasa de expansión. La duración del período de crecimiento de cada hoja en particular es independiente de la disponibilidad de N, pero no así la velocidad a que la

hoja crece. Por lo tanto con disponibilidad de N no limitante, se alcanza un mayor tamaño promedio de hojas.

Requerimientos de agua para el cultivo de la papa.

Doorembos y Kaasam (1979), indican que los requerimientos de agua por el cultivo de la papa, con un ciclo de 120 a 150 días varían de 500 a 700 mm, ET_m (Evapotranspiración máxima) lo cual depende casi exclusivamente del clima.

Las variaciones del coeficiente de cultivo (K_c), el cual nos indica la relación entre la ET_m y ET_o (Evapotranspiración de referencia), durante las diferentes etapas del cultivo de la papa, son para la etapa inicial de un periodo de 20 a 30 días, la variación es de 0.4 a 0.5; para la etapa de desarrollo de 30 a 40 días la variación es de 0.7 a 0.8; durante la etapa media del ciclo en el periodo de 30 a 60 días, los valores son de 1.05 a 1.2; durante la etapa de formación y crecimiento del tubérculo los valores van de 0.85 a 0.95 en un periodo de 20 a 35 días y finalmente la maduración, de 0.7 a 0.75.

Delis *et al.*, (1964), señalan que en trabajos que se realizaron en cultivos de la papa, encontraron que los períodos mas sensibles a las deficiencias de agua fueron las etapas de estolonización y el inicio de la tuberización, disminuyéndose considerablemente los rendimientos.

Shock *et al.*, (1997), indican que el cultivo de la papa debe ser regado cuando la tensión del suelo alcance un valor de 60Kpa o 0.6 centibares en cantidad suficiente para suministrar el agua perdida por evapotranspiración del cultivo desde el ultimo riego, con tensiómetros a una profundidad de 30 cm.

Curwen (1989), encontró que la planta de papa bajo condiciones óptimas de crecimiento y humedad, puede reemplazar hasta 4 veces al día su contenido de humedad por medio de la transpiración. Este cultivo es más sensible el déficit

hídrico del suelo que el cultivo de trigo, soya o frijol, siendo sus etapas fenológicas más sensibles a la formación de estolones y tubérculos.

Jones y Johnson (1958), señalan que riegos aplicados a 0.3 atmósferas de tensión de agua en el suelo en Alabama, EEUU, proporcionaron rendimientos mas altos en papa que en aquéllos donde la tensión fue mayor. Para mantener la tensión debajo de las 0.3 atmósferas, fue necesario regar cada 3.4 días, sequías durante las etapas iniciales de desarrollo de la planta de papa no son tan determinantes en la producción como lo serian en las siguientes etapas de desarrollo.

Doorenbos y Pruit (1977), recomiendan niveles altos de humedad después de la formación del tubérculo, por ser los períodos críticos, con respecto a la tensión de humedad del suelo en el cultivo de la papa,

Covarrubias y Contreras (1998), estudiaron el consumo de agua en el cultivo de la papa en los Estados de Nuevo León y Coahuila (Galeana y Sierra de Arteaga) respectivamente y encontraron que el consumo de agua total en el cultivo de papa a tres diferentes niveles de humedad del suelo tomados como valores alto, medio y bajo a 0.3, 1.0, y 5.0 bar de tensión en el suelo, respectivamente; varía aproximadamente entre 800 a 1000 mm en su ciclo y se determinó que el menor consumo de humedad del suelo corresponde a las variedades de ciclo precoz.

Concepto de Unidades Calor.

La temperatura afecta el desarrollo de las plantas a través de su influencia sobre la velocidad de los procesos metabólicos. Temperaturas bajas retardan el desarrollo, mientras que altas temperaturas (hasta cierto límite) lo aceleran y cortan el ciclo vegetativo de las plantas.

Para describir la influencia de la temperatura sobre la fenología de las plantas, se ha usado desde el siglo XVIII el concepto de sumas de temperaturas, mas conocido como unidades calor (UC), días grado ($^{\circ}D$), unidades térmicas de crecimiento o constantes térmicos. Este concepto postula que el crecimiento y desarrollo de un cultivo depende del calor que las plantas reciben. Esto quiere decir, que un cultivo alcanzará una determinada Etapa Fenológica cuando haya recibido cierta cantidad de calor, independientemente del tiempo requerido para ello (Hodges y Daraiswamy, citadas por Villalpando, 1985; Ortiz, 1987).

La temperatura es uno de los elementos meteorológicos que en mayor medida condicionan la adaptabilidad de una especie o variedad, de tal forma que se puede reconocer para cada genotipo, un umbral mínimo y un umbral máximo, fuera de los cuales se tiene una tasa de desarrollo igual a cero, y una temperatura o rango de temperatura óptima en donde la tasa de desarrollo es máxima (Villalpando, *et al.*, 1991).

La temperatura es considerada como la variable esencial del clima, por lo que es el elemento climático que más se estudia y del que mejor se conoce sus relaciones con el desarrollo de las plantas. Una forma de analizar el efecto de la temperatura sobre el desarrollo de los cultivos es a través de índices térmicos más comúnmente llamados día-grado. Estos índices han servido para caracterizar las fases fenológicas de diversos cultivos como manzano (Valentín *et al.*, 2001). Melón (Baker y Reddy, 2001) y cártamo (Villa y Catalán, 1992) y son por lo tanto útiles para predecir el desarrollo de los cultivos.

Días grado.

Obtener los día-grado en un día determinado para un cultivo en particular, involucra calcular el área comprendido bajo la curva de la temperatura del aire de ese día, delimitada por las temperaturas cardinales del cultivo en cuestión. Esas temperaturas cardinales comprenden una temperatura mínima por debajo

del cual no ocurre desarrollo y una temperatura máxima donde el desarrollo se detiene y son particulares para cada cultivo (Ortiz, 1987).

Se han desarrollado diversas metodologías para estimar los día-grado a partir de datos de la temperatura máxima y mínima del aire. Esas metodologías hacen suposiciones acerca de la forma de la curva diaria de la temperatura, tema que ha sido y estudiado en una forma amplia con el fin de estimar los día-grado de una manera mas exacta y evitar errores adicionales a los ya implícitos en esas estimaciones (Purcell, 2003; Higley 1986). Una de esas metodologías es la curva seno, propuesta por *Arnold* (1960) y modificada por Allen (1976).

El método de la curva seno estima los grados-día por periodos de 12 horas; es decir, se calculan los día-grados acumulados en la primer mitad del día con los datos de temperatura máxima del día y la del día siguiente (Allen, 1976). Estas estimaciones hechas por mitad del día implican comparar esta con un método estándar o patrón con el fin de corregir las posibles desviaciones que se pudieran presentar en los grados-día.

Programación de riego en tiempo real.

El Riego en Tiempo Real, permite determinar con precisión el momento oportuno de aplicar los riegos. El dictamen de riego se basa en el registro permanente de la humedad, temperaturas, radiación, viento, lluvia y todos los componentes de clima relacionados con el consumo de agua por los cultivos, que se envían desde las estaciones climatológicas a una base de datos en un centro de cómputo, previamente alimentado con información sobre las necesidades de agua por el cultivo de acuerdo a la etapa fenológica y las características del suelo, con las cuales, en base a un programa de cómputo, se realizan balances diarios de humedad, en tiempo real, definiéndose con una mayor precisión la lámina del riego y la fecha o intervalo para su aplicación (Allen et al., 1976).

Se denomina programación en tiempo real al que utiliza datos en tiempo real, es decir medidos diariamente o en fechas cercanas al momento actual. Llamamos calendario medio al que se elabora teniendo en cuenta valores medios de varios años (www.elriego.com/informa_te/riego_agricola).

En realidad es muy difícil encontrar valores de evapotranspiración potencial real (ETPr) diarios, por lo que la programación en tiempo real no suele utilizarse. A este respecto, los Servicios de Asesoramiento al Regante, como entidades de apoyo que prestan orientación y recomendaciones en materia de riegos, son una ayuda valiosa para hacer un uso eficiente del agua.

En los climas mediterráneos las lluvias se producen en otoño, primavera y ocasionalmente tormentas de verano. En esta situación se mantienen las fechas de riego obtenidas con un calendario medio de riego, y restamos el agua de lluvia que ha caído desde el último riego a la cantidad de agua a aplicar al riego siguiente (www.elriego.com/informa_te/riego_agricola).

En estas zonas también es una opción bastante recomendable no regar hasta alcanzar el contenido de humedad correspondiente al límite superior (que es lo más común), sino dejar parte del almacenamiento del suelo sin rellenar para aprovechar el agua de lluvia durante los días posteriores al riego.

III. MATERIALES Y MÉTODOS.

El clima en México hace que el riego sea prácticamente indispensable en gran parte de los terrenos agrícolas ya que posee un clima árido con lluvia menor a 400 mm. Y donde el 62.8% del territorio nacional es de riego indispensable. (Aguilera, 1990).

Con la información generada por la estación agroclimática automática ubicada en la estación experimental “Sierra de Arteaga” del INIFAP, cuyas coordenadas son: 25° 16´ 02’’ Latitud Norte, 100° 46´ 27’’ Longitud Oeste y 2,039 msnm; durante el ciclo primavera – verano (P – V) 2006, se relacionó los requerimientos de la temperatura del aire con la etapas de crecimiento del cultivo de papa sembrado en esta localidad (Cuadro 1).

Cuadro 1. Requerimientos de temperatura del aire en el cultivo de papa a través de su crecimiento.

Etapa	Temperatura °C	
	Rango	Óptima
Siembra a Emergencia	7 - 30	19
Emergencia a Desarrollo Vegetativo	6 - 32	24 - 26
Desarrollo Vegetativo a Estolonización	12 - 19	12 - 15
Estolonización a Tuberización	10 – 20	15 - 18

Fuente: Parga *et al.*, 2005, modificado por Covarrubias *et al.*, 2006.

Se evaluaron cinco métodos para estimar los días grado de crecimiento:

Método Exponencial (Villalpando, 1985):

Este método se basa en la ley de Van’t Hoff, que indica que la velocidad de reacción de un organismo se duplica por cada 10 °C de aumento de la temperatura. A su vez, el valor de la temperatura se considera como el método residual (Ortiz Solorio, 1987).

$${}^{\circ}\text{Di} = \sum \frac{(\text{Tx} - \text{Tb})}{10} \quad (1)$$

Donde:

${}^{\circ}\text{Di}$ = Días grado de crecimiento

Tx = Temperatura media (°C)

Tb = Temperatura base del cultivo (rango mínimo del cuadro 1)

Método Fisiológico (Lombard and Richarson, 1979):

Este método fisiológico considera un Tb fijo de 10 ° C, considera temperaturas máximas y mínimas.

$${}^{\circ}\text{Di} = \left(\frac{\Psi_{\text{max}} + \Psi_{\text{min}}}{2} \right) \quad (2)$$

Donde:

$$\Psi_{\text{max}} = 1.85(\text{Tmax}-10)-0.026 (\text{Tmax}-10)^2$$

$$\Psi_{\text{min}} = \text{Tmin} - 4.4$$

Tmax = Temperatura máxima (°C)

Tmin = Temperatura mínima (°C)

Método Residual (Wilson and Burnett, 1983):

Este método considera la temperatura media diaria y la diferencia radica en que la temperatura media diaria se le resta una constante, el denominado cero biológico esta constante en general se considera como 4.5, a un que de hecho es 6 °C; para cítricos 12 °C; para cacao 13 °C, entre otros (Ortiz Solorio, 1987).

$${}^{\circ}\text{Di} = \text{Tx} - \text{Tb} \quad (3)$$

A partir del siguiente método, se considera los límites de temperatura que afectan el desarrollo del cultivo, considerando los conceptos de Neild y Smith (1997), donde:

- 1) Las plantas no se desarrollan cuando la temperatura ambiental es menor que una temperatura base (Tb).
- 2) La tasa de desarrollo aumenta cuando la temperatura ambiental es mayor que la temperatura base (Tb).
- 3) Las variedades de los cultivos requieren de diferentes valores acumulados de °Di en función a su ciclo de desarrollo.

Método del Seno Modificado (Villa *et al.*, 2005):

Esta metodología asume que el ciclo diario de la temperatura del aire se aproxima a una curva seno, toma en cuenta un límite superior e inferior de crecimiento de un cultivo dado y considera el hecho de que la segunda temperatura mínima diaria no necesariamente es la misma que la primera. De esta forma pueden existir seis posibles relaciones entre el ciclo de la temperatura del aire y los límites de crecimiento, y estos son los siguientes (Allen, 1976):

1. Completamente sobre ambos límites
2. Completamente debajo de ambos límites
3. Completamente entre ambos límites
4. Interceptado por el límite inferior
5. Interceptado por el límite superior
6. Interceptado por ambos límites

Si $T_x \leq K_2$ y $T_x \geq K_1$

Donde:

K_1 = Temperatura límite inferior de crecimiento (°C)

K_2 = Temperatura límite superior de crecimiento (°C)

Entonces:

$${}^{\circ}\text{Di} = \frac{1}{2} T_x - K_1 \quad (4)$$

Si $T_x \geq K_1$ y K_2

Entonces:

$${}^{\circ}\text{Di} = \frac{1}{2} K_2 - K_1 \quad (5)$$

Si $T_x = K_2$ y $T_x \geq K_1$

Entonces:

$${}^{\circ}\text{Di} = \frac{1}{2\pi} \left\{ (T_x - K_1) \left(\frac{\pi}{2} - \Theta \right) + \alpha(\cos(\Theta)) \right\} \quad (6)$$

Donde:

$$\Theta = \text{sen}^{-1} \left\{ \frac{(K_1 - T_x)}{\alpha} \right\} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})}{2} \quad (8)$$

Método Gradual (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006):

La estimación diaria, i , de la variable día grado ($^{\circ}Di$) requiere conocer la temperatura media ambiental diaria (T_x), la cual se determina mediante las siguientes ecuaciones (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2004):

$$\begin{aligned} ^{\circ}Di &= T_x - K_1 \text{ si } T_x < K_2 \\ ^{\circ}Di &= K_2 - K_1 \text{ si } T_x \geq K_2 \\ ^{\circ}Di &= 0 \text{ si } T_x \leq K_1 \end{aligned} \quad (9)$$

Donde K_1 y K_2 son las temperaturas mínimas y máximas del aire, dentro del cual la planta se desarrolla. La temperatura puede expresarse en grados centígrados o Fahrenheit, y se tiene valores de K_1 y K_2 para varios cultivos agrícolas (Fox *et al.*, 1992).

La temperatura media diaria (T_x) es el promedio aritmético de los registros de la temperatura ambiental en un día x , siendo el caso más simple el promedio aritmético de las temperaturas máxima y mínima del día.

El método exponencial y residual consideran una T_b como el límite inferior del rango de temperatura en las etapas de desarrollo del cultivo y el método fisiológico considera una T_b fija de 10 °C. Los métodos seno modificado y gradual, sólo consideran las temperatura límites de crecimiento que son los rangos máximos y mínimos del Cuadro 1.

Estos dos últimos métodos suponen similar todo el ciclo de cultivo, sin considerar a las etapas de desarrollo del cultivo, por ello Covarrubias *et al.*, (2006), propusieron diferentes rangos para la acumulación de $^{\circ}Di$ en el cultivo de papa, donde los requerimientos climáticos son diferentes entre las etapas, característico de una especie de clima templado.

La comparación de métodos se determinó mediante la desviación porcentual del promedio (DPP):

$$DPP = \sum_{i=1}^n \left[\frac{D_1 - D_0}{D_0} \right]_i \times 100 \quad (10)$$

Donde:

D_1 = es el valor promedio de D_i acumulados hasta madurez fisiológica.

D_0 = es el valor de D_i acumulado de cada método analizado.

n = es el total de días analizados.

Para determinar la diferencia entre métodos se utilizó un diseño completamente al azar en arreglo simple para cada etapa fenológica, considerando los días de inicio a final de cada etapa, por lo cual, en cada etapa el número de repeticiones será diferente; los métodos para estimar los días grado son los tratamientos, por ello se analizó cada etapa en forma independiente.

El modelo del diseño experimental para cada etapa fenológica es el siguiente:

$$Y_{ik} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ik}, \quad (11)$$

Donde:

Y_{ik} = variable de respuesta.

μ = Efecto promedio de los tratamientos.

α = Efecto del método para estimar los días grado

Con $i = 1, 2, \dots, a = 5$, $k = 1, 2, \dots, r = n$

n = El número de días de cada etapa de desarrollo del cultivo de papa (Cuadro1).

ε_{ik} están DNI $(0, \sigma^2)$ = Y el error está Distribuido Normalmente Independiente

Las variables de análisis fueron los días grado promedio obtenidos de cada método y el DPP con los días grado acumulados en cada etapa y al final del cultivo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

La duración de cada etapa de desarrollo del cultivo de papa en Emiliano Zapata. Arteaga, Coahuila, durante el ciclo P-V 2006, se muestra en el cuadro 2; estos valores del desarrollo del cultivo nos permiten determinar los días grado para cada etapa de desarrollo de la papa y el acumulado durante todo el ciclo.

Cuadro 2. Etapas fenológicas de la papa y su duración durante el ciclo P-V 2006, en Emiliano Zapata, Arteaga, Coahuila.

Etapas	Duración	Acumulados
	Días	Días
Siembra - Emergencia	25	25
Emergencia - Estolonización	28	53
Estolonización - Tuberización	10	63
Tuberización – Madurez fisiológica	87	150

El cultivo de la papa cuyo producto comercial y de consumo es el tubérculo, requiere del mayor tiempo para su crecimiento (87 días) durante el total del ciclo de desarrollo, por que la etapa de tuberización se divide en dos etapas, como crecimiento de tubérculo y como desarrollo de tubérculo (Covarrubias *et al.*, 2007) con un período de tuberización a madurez fisiológica de 65 días, aunque Badillo *et al.*, (2001) definen a estas etapas como llenado de tubérculo y crecimiento final del tubérculo y el período de tuberización a madurez fisiológica es alrededor de 50 días para la variedad Alpha.

Por tratarse de clones experimentales, estos presentan un ciclo de 125 días de emergencia a madurez fisiológica, que es característico de variedades de ciclo tardío (Parga *et al.*, 2005).

La estimación diaria de los Di mediante la temperatura del aire obtenida de los registros de la estación automática y su efecto en la etapa de Siembra -

Emergencia se muestra en el cuadro 3; el método fisiológico supera significativamente a todos los métodos, los métodos gradual y residual son similares estadísticamente y ambos superan significativamente al resto de los métodos, esto indica similitud entre estos métodos, tanto en D_i como en D_i acumulados.

Cuadro 3. Comparación de métodos para estimar días grado en la etapa de siembra a emergencia del cultivo de papa.

Método	$D_{i\mu}$	D_i Acum	DPP
Fisiológico	16.03 a	384	32.25
Exponencial	8.64 c	205	29.28
Residual	14.48 b	345	18.81
Seno	7.26 d	173	40.59
Gradual	14.48 b	345	18.81
Promedio		290	

$D_{i\mu}$ = Días grado promedio. DPP= Diferencia promedio porcentual.

a, b, c, d= Valores con literales diferentes en una columna son diferentes. Tukey ($p \leq 0.05$).

El método fisiológico y el seno son diferentes estadísticamente, el primero sobreestima y el segundo subestima el calculo de los D_i con base al promedio del D_i acumulado. El valor de DPP indica que el método residual y gradual presenta una desviación menor al 20%.

De la etapa de emergencia a estolonización (Cuadro 4), el comportamiento de los $D_{i\mu}$ es similar a la etapa anterior, los métodos residual y gradual son significativamente iguales, por lo cual podemos indicar que estos métodos son análogos y adecuados para estimar los requerimientos de calor del cultivo en estas dos primeras etapas, que son las que requieren de mayor temperatura (30 y 32 °C) para la producción adecuada de área foliar, que repercute en una mayor fotosíntesis neta del cultivo (Errebhi *et al.*, 1999).

Cuadro 4. Comparación de métodos para estimar días grado en la etapa de emergencia a estolonización del cultivo de papa.

Método	$D_{i\mu}$	D_i Acum	DPP
--------	------------	------------	-----

Fisiológico	16.31 a	455	29.55
Exponencial	8.93 c	256	27.10
Residual	14.67 b	418	19.02
Seno	7.31 d	209	40.49
Gradual	14.57 b	418	19.02
Promedio		351	

$D_i\mu$ = Días grado promedio. DPP= Diferencia promedio porcentual.

a, b, c, d= Valores con literales diferentes en una columna son diferentes. Tukey ($p \leq 0.05$).

En este período el valor de DPP indica que el método residual y gradual tiene una desviación menor al 20%.

En las dos últimas etapas donde se inicia la estolonización y tuberización, los requerimientos del cultivo corresponden a climas templados (19 y 20 °C).

El período de Estolonización a tuberización (Cuadro 5), que presentó la menor duración (10 días) indica a los métodos exponencial y gradual como similares estadísticamente, la diferencia es que el método gradual utiliza las temperaturas límite de crecimiento en las etapas de desarrollo y no así el método exponencial.

Cuadro 5. Comparación de métodos para estimar días grado en la etapa de estolonización a tuberización del cultivo de papa.

Metodo	$D_i\mu$	Di Acum	DPP
Fisiológico	17.04 a	188	96.73
Exponencial	5.94 c	65	32.22
Residual	10.4 b	114	19.05
Seno	3.35 d	37	61.19
Gradual	6.7 c	74	22.38
Promedio		95	

$D_i\mu$ = Días grado promedio. DPP= Diferencia promedio porcentual.

a, b, c, d= Valores con literales diferentes en una columna son diferentes. Tukey ($p \leq 0.05$).

En este período el valor de DPP indica que el método gradual tiene una desviación menor al 20%.

Los D_i son diferentes significativamente en la etapa tuberización a madurez fisiológica (Cuadro 6), pero esta diferencia sólo es marcada entre el método fisiológico y el exponencial; el resto de los métodos es similar estadísticamente. Pero, el método gradual no sobrestiman o subestiman los D_i acumulados y presenta una DPP de 2.45%, la menor en todo el estudio.

Cuadro 6. Comparación de métodos para estimar días grado en la etapa de tuberización a madurez fisiológica del cultivo de papa.

Método	$D_{i\mu}$	D_i Acum	DPP
Fisiológico	16.42 a	1427	44.33
Exponencial	6.37 d	555	43.91
Residual	11.09 bc	965	2.45
Seno	13.63 ab	1185	19.90
Gradual	9.33 cd	812	17.87
Promedio		989	

$D_{i\mu}$ = Días grado promedio. DPP= Diferencia promedio porcentual.

a, b, c, d= Valores con literales diferentes en una columna son diferentes. Tukey ($p \leq 0.05$).

Para la generación de un programa de riegos en tiempo real, es necesario conocer los D_i acumulados, en el Cuadro 7, se presenta la comparación de los métodos durante todo el ciclo de desarrollo del cultivo, donde el método fisiológico y el exponencial son diferentes estadísticamente, el primero subestima y el segundo sobreestima el calculo de los D_i . El valor de DPP indica que el método residual, seno modificado y gradual tienen una desviación menor al 10% y si se considera un límite menor al 5%, entonces sólo el método gradual se sugiere que sea el utilizado.

Cuadro 7. Comparación de métodos para estimar días grado en el cultivo de papa.

Método	$D_{i\mu}$	D_i Acum	DPP
Fisiológico	16.37 a	2454	42.18
Exponencial	7.20 c	1081	37.38

Residual	12.27 b	1841	6.69
Seno	10.70 b	1604	7.05
Gradual	10.99 b	1649	4.44
Promedio		1726	

$D\mu$ = Días grado promedio . DPP= Diferencia promedio porcentual.
a, b, c= Valores con literales diferentes en una columna son diferentes.
Tukey ($p \leq 0.05$).

Hay evidencia de que los programas de riego en tiempo real para el cultivo de papa han sido evaluados con el método residual (Pérez, 2000) y con el método gradual (Ojeda-Bustamante, 2000), tanto uno como otro método son fácil de utilizar sin un procedimiento matemáticos sofisticado, aunque el método residual considera una temperatura base (T_b) y no un rango de temperaturas para el crecimiento del cultivo, que es lo más conveniente para ajustar a los requerimientos de cada etapa de desarrollo del cultivo; por ello se sugiere utilizar el método gradual para los programas de riego en el cultivo de papa utilizando los límites de temperatura de crecimiento para cada etapa fenológica.

V. CONCLUSIONES.

Los métodos evaluados fueron comparados entre si por lo que sus resultados son de una evaluación relativa, por no tener un parámetro de comparación fidedigno por tratarse de variables estimativas.

Aún así, el método gradual es el más adecuado para emplearse en los cálculos de los días grado porque presenta menor desviación promedio porcentual y mayor facilidad en su utilización.

LITERATURA CITADA.

Allen, J. C. 1976. A modified sine wave method for calculating degree days.
Env. Ent. 5:388-396.

Aguilera C, M. 1990. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 321 p.

Aldabe, Luís y Dogliotti, Santiago. 2000. Bases fisiológicas del crecimiento y desarrollo del cultivo de papa. Universidad de la República – Facultad de Agronomía Ciclo de Formación Central Agronómica Curso de Fisiología de los Cultivos. P 27. Disponible en:

http://www.fagro.edu.uy/~cultivos/hortalizas/Repartido_Fisiologia_Papa.pdf

Allen, J. C. 1976. A modified sine wave method for calculating degree days.
Env. Ent. 5:388-396.

Aldabe, L. y Aldabe, R. 1976. El Cultivo de la Papa en el Uruguay. Diafi.

Arnold, Ch. Y. 1960. Maximum-minimum temperaturas as a basis for computing heat units. Amer. Soc. Hort. Sci.76:682-692.

Badillo-Tovar, V.; J. Z. Castellanos; P. Sánchez-García; A. Galvis-Spinola; E. Alvarez-Sánchez; J. X. Uvalle-Bueno; D. González-Eguiarte y S. A. Enríquez-Reyes. 2001. Niveles de referencia de nitrógeno en tejido vegetal de papa var. Alpha. Agrocienca 35:615-623.

Baker, J. T. and V. R. Reddy. 2001. Temperature Effects on Phenological Development and Yield of Muskmelon. Annals of Botany 87:605-613.

- Biemond, H., 1995. Nitrogen nutrition effects on development growth and nitrogen accumulation of vegetables. Ph D. Thesis, Wageningen University.
- Burton, W.G. 1989. The Potato. Longman Scientific & Technical. N. York.. 3^o Ed.
- Chávez, R. 1998. Estado actual del conocimiento del agua subterránea en el estado de Guanajuato. *In*: J.Z. Castellanos, C. Hernandez and J. Carrillo (eds.), Proceedings of the First International Symposium on Groundwater in Mexico. Mexican Society of Soil Science. Chapingo, Mex. p 19-28.
- Covarrubias-Ramírez, J. M. y F. J Contreras de la R. 1998. Consumo de agua en el cultivo de la papa para región de la Sierra de Arteaga, Coah. *In*: Memorias del VIII Congreso Nacional de Papa. Agosto. Toluca. Edo. de Mex. 4 p.
- Covarrubias-Ramírez, J. M., S. Castillo-Aguilar, J. A. Vera-Núñez, R. Núñez-Escobar, P. Sánchez-García, R. Aveldaño-Salazar y J. J. Peña-Cabriales. 2005. Absorción y eficiencia en uso de fósforo en papa cultivar alpha con ³²P. *Agrociencia* 39:127-136.
- Covarrubias Ramírez., J. M., G. Briones S., L. Rojas P. y J. J. Cortes B. 2006. Programa de riego en tiempo real para el cultivo de papa. *In*: Memoria Reunión Científica Agropecuaria y Forestal. CD-ROM. CERIB-CIRNE-INIFAP. Cd. Río Bravo, Tamps.. p 110.
- Covarrubias Ramírez, Juan M.; Leila M. Vásquez Siller; Ma. del R. Zúñiga Estrada; José A. Garzón Tiznado; Abiel Sánchez Arizpe; Sergio J. García Garza y Ma. del C. Potisek Talavera. 2007. Balance nutrimental y su relación con punta morada de la papa en Nuevo León. *In*: Vásquez

Alarcón, A. y I. Aaimers de A. (eds). Memoria del XVII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. León, Gto. 17:539-542.

Curwen, D. 1989. Water management. *In*: Potato Health management. Edit by R. Rowe. The American phytopathological society. p. 67-75.

Delis, B. R.; I. Ponce and R. Tirzo. 1964. Studies on water requirement of horticultural crops. Influence of drought at different growth stages of potato on the tuber's yield. *Agron. J.* 56: 377-381.

Doorembos, J. and A. H . Kaasam. 1979. Yield responds to water. F. A. O. Irrigation and Drainage paper. 33. Roma. Italia. 125 p.

Doorembos, J. and W. O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. FAO paper 24. Roma, Italia. 144 p.

Errebhi, M., C. J. Rosen, F. I. Lauer, M. W. Martin, J. B. Bamberg and D. E. Birong. 1999. Evaluation of tuber bearing *Solanun* species for nitrogen use efficiency and biomass partitioning. *Amer. J. Potato Res.* 76:143-151.

Fox, F. A. Jr., T. Scherer, D. C. Slack, and L. J. Clark. 1992. AZCHED. Arizona Irrigation Scheduling. User's manual. Version 1.01. University of Arizona Cooperative Extension. Agricultural and Biosystem Engineering. Tucson, Arizona, USA. 12 p.

http://www.elriego.com/informa_te/riego_agricola/fundamentos_riego/programacion_riegos/calendario_riego.htm Fundamento de riego Agrícola. Índice. Programación de riegos. Calendario medios de riego. Programación de riego en tiempo real Info@elriego.com. (+34) 91 845 9809. Disponible en:

- Higley, G. L. *et al.*, 1986. DEGDAY: A program for calculating degree-days, and assumptions behind the degree-days approach. *Forum: Environ. Entomol.* 15:999-1016.
- Jones, S. T. and W. A. Johnson. 1958. Effects of irrigation at different levels of soil moisture and of imposed droughts on yields of onions and potatoes. *Proc. Am. Hort. Sci* 71: 440-445.
- Kooman, P.L., Haverkort, A.J., 1994. Modelling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. En: A.J. Haverkort y D.K.L. MacKerron (Eds.) *Potato Ecology and modeling of crops under conditions limiting growth*, Kluwer Academic Publishers, 379 p.
- Kooman, P.L., 1995. Yielding ability of potato crops as influenced by temperature and day length. Ph D. Thesis, Wageningen University.
- Kooman, P.L., Fahem, M., Tegera, P., Haverkort, A.J., 1996. Effect of climate on different potato genotypes: 1. Radiation interception, total and tuber dry matter production. *European Journal of Agronomy* 5, 193-205.
- Kramer, K. 1994 Selecting a model to predict the onset of growth of *Fagus sylvatica*. *J. Appl. Ecol.* 31:172-181.
- Lombard, P. and E. A. Richardson. 1979. Physical principles involved in controlling phenological development. *In*: B. J. Barfield and J. F. Gerber (eds). *Modification of the aerial environment of plants*. ASAE. Monograph No. 32. St. Joseph, Mich.
- Moorby and Milthorpe. *In* Evans. *Fisiología de los Cultivos*. Cap. 8 PAPA. Hemisferio Sur. Buenos Aires. 1983.

- Neild, R. E. and D. T. Smith. 1997. Maturity dates and freeze risks based on growing degree days. University of Nebraska. Paper G83-673-A. 5 p.
- Ojeda-Bustamante, W. 2000. Metodologías para calendarizar el riego en el cultivo de papa. *In: Memorias del IX Congreso Nacional de Productores de Papa*. León, Gto. 15 p.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra y H. Unland-Weiss. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia* 40: 13-25.
- Ortiz S., C. 1987. Elementos de Agrometeorología Cuantitativa con Aplicaciones en la República Mexicana. 3a Edición. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.
- Parga T., V. M.; García G., S. J.; Villavicencio G., E. E.; Sánchez S., J. A.; Sánchez V., I.; Contreras de la R., F. J.; Arellano G., M. A.; Covarrubias-Ramírez, J. M.; Rubio C., O. A. y J. Fernández E. 2005. Tecnología para producir papa en Coahuila y Nuevo León. INIFAP-CIRNE. Campo Experimental "Saltillo". Folleto Técnico Núm. 5. Coahuila, México. 164 p.
- Pérez S., F. 2000. Generación de un programa de riego para el cultivo de la papa en la región de Arteaga, Coahuila. Tesis de Maestría. U.A.A.A.N. Buenavista, Saltillo, Coah. 121 p.
- Purcell, L. C. 2003. Comparison of thermal units derived from daily and hourly temperatures. *Crop Sci.* 43:1874-1879.

- Ritchie, J. T. y D. S. NeSmith. 1991. Temperature and crop development. P 5-29. *In* J Hanks and J. T. Ritchie (ed) Modeling plant and soil systems. Agron. Monogr. 31. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Shock, C. C.; E. B. G. Feibert and L. D. Saunder. 1997. Precision scheduling with granular matrix sensors. *In*: proceedings of the international conference about evapotranspiration and irrigation scheduling. ASAE Nov. 3-6. San Antonio, Texas. EEUU.
- Valentín, N., G. Me, R. Ferrero and F. Spanna. 2001. Use of bioclimatic indexes to characterize phenological phases of apple varieties in northern Italy. *Int. J. Biometeorol.* 45:191-195.
- Varas Bordeu Edmundo 2000. Efecto del Riego en la producción y calidad de la papa (*Solanum tuberosum* L). Disponible en http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_verde/TC-153.htm
- Villa C., M. y E. A. Catalán V. 1992. Requerimientos agroclimáticos de la variedad de cártamo Gila' (*Carthamus tinctorius* L.). *TERRA*.10: 37-42.
- Villa-Castorena, M., E. A. Catalán V., M. A. Inzunza I. y S. F. Mendoza M. 2005. Evaluación de la metodología curva seno modificada para estimar días grado en tres localidades del norte de México. *Agrofaz* 5(2):851-856.
- Villalpando I., J. F. 1985. Taller de trabajo sobre metodologías de investigación en agroclimatología. INIA. Zapopan, Jal. 87 p.
- Villalpando I., J., F. S. 1991. Regiones agrícolas eficientes para la producción de semillas. Apuntes. Guadalajara, Jalisco.

Vos, J., 1994. Nitrogen and growth of potato crops. En: A.J. Haverkort y D.K.L. MacKerron (Eds.) Potato Ecology and modeling of crops under conditions limiting growth, Kluwer Academic Publishers, 379 p.

Vos, J., y Biemond, H., 1992. Crop physiology of potato (*Solanum tuberosum*): responses to photoperiod and temperature relevant to crop modeling. En: A.J. Haverkort y D.K.L. MacKerron (Eds.) Potato Ecology and modeling of crops under conditions

Wilson, L. T. and W. W. Burnett. 1983. Degree days: an aid in crops and pest management. California Agriculture, Jan-Feb. p. 6-7.

APÉNDICE

Cuadro 1A. Base de datos para estimar días grado en el cultivo de papa.

Etapa	Fecha	dds	dde	Max	Min	Media
Siembra	19	1	-23	35	1	18
	20	2	-22	42	3	23
mayo	21	3	-21	42	3	23
	22	4	-20	39	2	21
	23	5	-19	37	5	21
	24	6	-18	37	5	21
	25	7	-17	40	4	22
	26	8	-16	43	5	24
	27	9	-15	29	7	18
	28	10	-14	32	12	22
	29	11	-13	32	7	20
	30	12	-12	40	7	24
	31	13	-11	40	7	24
	1	14	-10	37	7	22
	2	15	-9	31	7	19
Emergencia	3	16	-8	32	7	20
	4	17	-7	35	12	24
	5	18	-6	33	7	20
	6	19	-5	36	8	22
	7	20	-4	43	4	24
	8	21	-3	41	4	23
	9	22	-2	40	6	23
	10	23	-1	32	5	19
	11	24	0	36	7	22
	12	25	1	44	4	24
	13	26	2	37	4	21
	14	27	3	44	3	24
	15	28	4	32	4	18
16	29	5	37	7	22	
17	30	6	40	7	24	
18	31	7	36	7	22	
Junio	19	32	8	32	9	21
	20	33	9	33	8	21
	21	34	10	35	7	21
	22	35	11	32	9	21
	23	36	12	29	9	19
	24	37	13	29	10	20
	25	38	14	29	9	19
	26	39	15	32	10	21
	27	40	16	25	12	19
	28	41	17	34	8	21
	29	42	18	25	7	16
	30	43	19	29	11	20

Cuadro 1A. Continuación.

Etapa	Fecha	dds	dde	Max	Min	Media
	1	44	20	44	9	27
	2	45	21	23	12	18
	3	46	22	29	12	21
	4	47	23	24	15	20
	5	48	24	33	13	23
	6	49	25	29	12	21
	7	50	26	40	12	26
	8	51	27	33	11	22
	9	52	28	33	11	22
Estolonización	10	53	29	32	11	22
	11	54	30	41	11	26
	12	55	31	40	10	25
	13	56	32	44	10	27
Julio	14	57	33	40	8	24
	15	58	34	32	8	20
	16	59	35	26	8	17
	17	60	36	30	11	21
	18	61	37	39	7	23
	19	62	38	39	8	24
Tuberización	20	63	39	29	7	18
	21	64	40	29	7	18
	22	65	41	32	7	20
	23	66	42	32	7	20
	24	67	43	33	7	20
	25	68	44	33	7	20
	26	69	45	28	9	19
	27	70	46	36	15	26
	28	71	47	26	15	21
	29	72	48	33	15	24
	30	73	49	32	11	22
	31	74	50	44	9	27
	1	75	51	38	11	25
	2	76	52	33	14	24
	3	77	53	28	15	22
	4	78	54	25	15	20
	5	79	55	35	10	23
Agosto	6	80	56	32	9	21
	7	81	57	25	9	17
	8	82	58	25	11	18
	9	83	59	32	8	20
	10	84	60	33	9	21
	11	85	61	36	11	24
	12	86	62	36	8	22
	13	87	63	29	10	20
	14	88	64	37	10	24

15	89	65	38	12	27
16	90	66	40	12	24
17	91	67	44	10	27
18	92	68	29	7	18
19	93	69	36	8	22

Cuadro 1A. Continuación.

Etapa	Fecha	dds	dde	Max	Min	Media
	20	94	70	29	8	19
	21	95	71	33	8	21
Agosto	22	96	72	33	8	21
	23	97	73	33	8	21
	24	98	74	32	8	20
	25	99	75	25	13	19
	26	100	76	29	8	19
	27	101	77	44	11	28
	28	102	78	44	11	28
	29	103	79	36	7	22
	30	104	80	44	7	26
	31	105	81	21	10	16
	1	106	82	27	10	19
	2	107	83	41	4	23
	3	108	84	43	3	23
	4	109	85	36	7	22
	5	110	86	29	11	20
	6	111	87	20	11	16
	7	112	88	25	14	20
	8	113	89	25	14	20
	9	114	90	29	13	21
	10	115	91	37	14	26
	11	116	92	29	15	22
Septiembre	12	117	93	29	15	22
	13	118	94	26	15	21
	14	119	95	25	14	20
	15	120	96	40	14	27
	16	121	97	42	14	28
	17	122	98	42	15	29
	18	123	99	36	15	26
	19	124	100	35	12	24
	20	125	101	36	5	21
	21	126	102	37	6	22
	22	127	103	29	7	18
	23	128	104	44	7	26
	24	129	105	29	11	20
	25	130	106	25	10	18
	26	131	107	31	7	19
	27	132	108	33	9	21
	28	133	109	39	7	23
	29	134	110	42	5	24

	30	135	111	29	5	17
	1	136	112	33	8	21
	2	137	113	33	7	20
	3	138	114	22	11	17
	4	139	115	29	7	18
Octubre	5	140	116	28	3	16
	6	141	117	39	3	21
	7	142	118	22	3	13
	8	143	119	32	8	20

Cuadro 1A. Continuación.

Etapa	Fecha	dds	dde	Max	Min	Media
	9	144	120	32	7	20
	10	145	121	28	9	19
Octubre	11	146	122	33	7	20
	12	147	123	33	9	21
	13	148	124	30	10	20
	14	149	125	32	10	21
Madurez Fis.	15	150	126	21	15	18

dds = días después de siembra, dde = días después de emergencia.

Max = Temperatura máxima, Min = Temperatura mínima

Media = Temperatura media, todas en °C.

Los datos se procesaron utilizando el programa SAS (Statistics Analysis System).

Cuadro 2A. Análisis de varianza de los tratamientos en el periodo de siembra a emergencia del cultivo de papa.

Fuente Variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Fc	F α
Métodos	4	1552	388	161	<.0001 **
Error	120	289	2.4		
Total	124	1841			

** = Altamente significativa

Cuadro 3A. Análisis de varianza de los tratamientos en el periodo de emergencia a estolonización del cultivo de papa.

Fuente Variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Fc	F α
Métodos	4	1766	441	93	<.0001 **
Error	135	640	4.7		
Total	139	2405			

** = Altamente significativa

Cuadro 4A. Análisis de varianza de los tratamientos en el periodo de estolonización a tuberización del cultivo de papa.

Fuente Variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F _c	F _α
Métodos	4	1127	282	71	<.0001 **
Error	45	179	4.0		
Total	49	1306			

** = Altamente significativa

Cuadro 5A. Análisis de varianza de los tratamientos en el periodo de tuberización a madurez fisiológica del cultivo de papa.

Fuente Variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F _c	F _α
Métodos	4	5205	1301	19	<.0001 **
Error	430	29414	68.4		
Total	434	34620			

** = Altamente significativa

Cuadro 6A. Análisis de varianza de los tratamientos en el periodo de siembra a madurez fisiológica del cultivo de papa.

Fuente Variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F _c	F _α
Métodos	4	6566	1642	682	<.0001 **
Error	745	34169	45.9		
Total	749	40736			

** = Altamente significativa