



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

---

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

## ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LA CUENCA DE MÉXICO

ALONDRA VILLEDA MONSALVO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2013

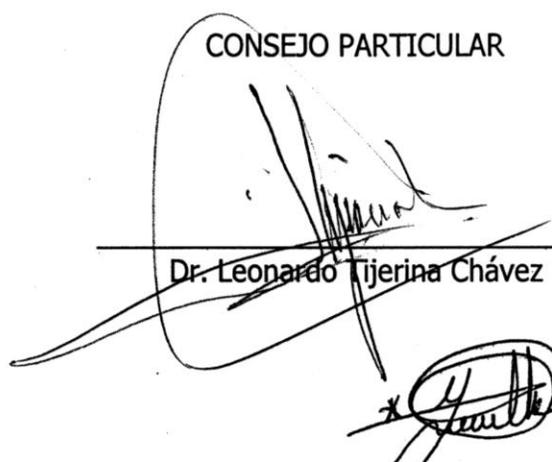
La presente tesis titulada: ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LA CUENCA DE MÉXICO, realizada por el alumno: ALONDRA VILLEDA MONSALVO bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



---

Dr. Leonardo Tijerina Chávez

ASESOR



---

MC. Guillermo Crespo Pichardo

ASESOR



---

Dr. Ramón Arteaga Ramírez

**ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LA CUENCA DE MÉXICO**  
**Villeda Monsalvo Alondra, MC.**  
**Colegio de Postgraduados, 2013**

**RESUMEN**

La variación de las condiciones climáticas en este país ha sido un factor limitante para poder establecer cultivos sustentables en regiones en donde solo se practica agricultura de autoconsumo. Este tipo de fenómenos no se pueden cambiar, sin embargo se pueden establecer cultivos que se adapten a las condiciones del lugar, es por eso que en este trabajo se analizaron las variables meteorológicas de temperatura y precipitación para saber si los cultivos de Frijol, Haba, Maíz, Papa y Trigo presentan condiciones para desarrollarse satisfactoriamente en la cuenca de México. Se procesaron las variables meteorológicas con el programa Excel, mediante el análisis Frecuencial de Lluvias se determinó el periodo o estación de crecimiento, pero para fines prácticos se tomó un solo inicio de estación de crecimiento para todas las estaciones de estudio; para el periodo de crecimiento se calculó la probabilidad de no excedencia de lluvias a 0.7 y 0.2. Posteriormente se calculó el balance hídrico simplificado para cada estación a dos niveles de probabilidad, obteniendo con ella las deficiencias, la humedad almacenada y los excesos que presentaban los cultivos estudiados para cada estación; para zonificar la región de la cuenca de México se calculó el Índice de satisfacción de necesidades hídricas de los cultivos. Con el análisis se concluye que el cultivo de Maíz presenta más problemas de adaptación en la región de estudio, se recomienda la siembra de maíz bajo la aplicación de riegos en etapas críticas del cultivo. El cultivo que tiene más adaptación a la zona de estudio es el Frijol.

En términos generales todos los cultivos estudiados pueden establecerse sin problemas en la región suroeste ya que esta zona tiene potencial para la adaptación climatológica de los cultivos en base al Índice de satisfacción de necesidades hídricas y los excesos que presentan son pocos y no son muy altos.

**Palabras claves:** zonificación, balance hídrico, índice de satisfacción de necesidades hídricas.

**AGROCLIMATIC ZONING OF THE MEXICAN BASIN**  
**Villeda Monsalvo Alondra, MC.**  
**Colegio de Postgraduados, 2013**

**ABSTRACT**

The variation of climatic conditions in this country has been a limiting factor to be able to establish sustainable crops in regions where only self-consuming agriculture is practiced. These kind of phenomenon can not be changed, although, adaptable crops to the conditions of the place can be established, that is why, in this *investigation* the climatic variables of rainfall and temperature were analyzed, to know if the Bean, Corn, Potato and Wheat crops have the conditions to develop satisfactory in the basin of Mexico. The meteorological variables were processed in Excel, by means of frequency rainfall analysis, the growing period or season was determined; during this period the excess of rainfall probability was calculated to 0.7 and 0.2 for all the studied seasons. Subsequently the simplified hydric balance was calculated for each season to the different levels of probability, obtaining from it the deficiencies, the stored humidity, and the excesses that the studied crops presented in each season; to determine the region of the basin o Mexico the rate of satisfaction of the hydric needs of the crops.

The analysis concludes that the cultivation of corn has more adaptation problems in the study region, is recommended to plant corn under the application of irrigation at critical stages of the crop. The crop that is more adapted to the study area is the Bean.

In general, all studied crops can be made without problems in the southwest region as this area has potential for climatological crop adaptation based on the satisfaction index and excess water needs they present are few and not very high.

**Keywords:** zoning, water balance, rate of satisfaction of the hydric needs.

## DEDICATORIA

A Dios que me dio la oportunidad de vivir y regalarme una familia maravillosa.

A mi esposo (Víctor) por amarme, apoyarme y alentarme siempre.

A mis hijos (Santiago y Leonardo), no hay nada en la vida que se compare con la alegría de tenerlos a mi lado.

A mis padres, por que sin su ayuda y apoyo me habría sido imposible realizar mi maestría.

**A todos los amo**

*Alondra*

## AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Leonardo Tijerina Chávez, M.C. Guillermo Crespo Pichardo, Dr. Ramón Arteaga Ramírez y M.C. Gabriel Haro Aguilar** por su valiosa dirección, confianza, apoyo y paciencia, siempre dispuestos al desarrollo de este trabajo. Además de dedicar parte de su valioso tiempo a la revisión y corrección de la presente tesis.

Al Colegio de Postgraduados y especialmente al programa de Hidrociencias por darme la oportunidad de seguir formándome como profesionista.

Quiero expresar mi gratitud al CONACYT y al COMECYT que han apoyado financieramente mi estudio y mi trabajo de investigación.

A todas aquellas personas que apoyaron la realización del presente trabajo.

*Alondra*

## ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	OBJETIVOS.....	2
2.1.	GENERAL.....	2
2.2.	PARTICULARES.....	2
3.	HIPÓTESIS.....	3
3.1.	GENERALES.....	3
3.2.	PARTICULARES.....	3
4.	REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
4.1.	Zonificación agrícola.....	4
4.1.1.	Tipos de zonificación .....	4
4.2.	Precipitación.....	5
4.3.	Temperatura.....	6
4.4.	Proceso de evapotranspiración .....	7
4.4.1.	Evaporación .....	7
4.4.2.	Transpiración .....	8
4.4.3.	Evapotranspiración (ET).....	10
4.5.	Evapotranspiración de Referencia Método Thornthwaite (ETo) .....	11
4.6.	Evapotranspiración máxima (ETM).....	12
4.7.	Coeficiente de cultivo (kc) .....	12
4.8.	Humedad en las plantas .....	13
4.8.1.	Humedad aprovechable por las plantas .....	14
4.9.	Humedad en el suelo.....	15
4.9.1.	Capacidad de almacenamiento del suelo (CA).....	15
4.10.	Análisis Temporal de los Datos Meteorológicos: Análisis Frecuencial de Lluvias .....	17
4.10.1.	Análisis Frecuencial de la precipitación .....	17
4.10.2.	Aplicación práctica en la agricultura del Análisis Frecuencial de Lluvias.....	18
4.11.	Determinación del periodo de cultivo .....	18
4.11.1.	Estación de crecimiento .....	18
4.12.	Balace hídrico .....	19

4.12.1.	Ecuación general del balance hídrico.....	21
4.12.2.	Balance hídrico simplificado .....	22
4.12.3.	Intervalo de tiempo .....	23
4.13.	Precipitación efectiva .....	25
4.13.1.	Probabilidad de lluvia .....	25
4.13.2.	Distribución Normal.....	25
4.13.3.	Distribución raíz cubica.....	27
4.14.	Índice de satisfacción de las necesidades hídricas (ISNH).....	27
5.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
5.1.	Descripción general de la zona de estudio .....	29
5.1.1.	Generalidades.....	29
5.1.2.	Orografía .....	30
5.1.3.	Hidrografía.....	30
5.2.	Delimitación de la cuenca.....	31
5.3.	Selección de las estaciones meteorológicas .....	32
5.4.	Calculo de la ETo.....	35
5.5.	Análisis Frecuencial de Lluvias .....	39
5.6.	Cálculo del coeficiente de cultivo (Kc) .....	40
5.7.	Cálculo de la Evapotranspiración del cultivo (ETM).....	47
5.8.	Cálculo del balance hídrico (método simplificado).....	48
5.8.1.	Cálculo de la capacidad de almacenamiento del suelo (CA).....	48
5.8.2.	Determinación de la precipitación para el balance hídrico.....	48
5.9.	Índice de satisfacción de necesidades hídricas.....	49
5.10.	Cartografía.....	49
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	50
6.1.	Análisis Frecuencial de Lluvias .....	50
6.2.	Inicio de la estación de crecimiento .....	51
6.3.	Probabilidad de lluvia .....	52
6.4.	Cálculo de la Capacidad de Almacenamiento de agua (CAA).....	57
6.5.	Balance Hídrico.....	60
6.6.	Índice de Satisfacción de Necesidades Hídricas.....	76
7.	CONCLUSIONES .....	82

8.	RECOMENDACIONES .....	83
9.	LITERATURA CITADA.....	84
10.	ANEXOS .....	87

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Número de estaciones por estado.....	32
Cuadro 2. Ubicación de las estaciones y años de estudio.....	33
Cuadro 3. Cálculo del Índice de calor anual y el parámetro a.....	36
Cuadro 4. Índice de calor anual y parámetro a para la estación 15001.....	37
Cuadro 5. Cálculo de la ETo por el método del Thornthwaite.....	38
Cuadro 6. Cálculo del Análisis Frecuencial de Lluvias.....	40
Cuadro 7. Duración de las etapas del ciclo vegetativo de los cultivos estudiados.....	41
Cuadro 8. Valores del Kc para Frijol.....	43
Cuadro 9. Valores del Kc para Papa.....	43
Cuadro 10. Valores del Kc para Trigo.....	44
Cuadro 11. Valores del Kc para Haba.....	45
Cuadro 12. Valores del Kc para Maíz.....	46
Cuadro 13. Lluvia acumulada para la probabilidad 70 y 20% para los cultivos de estudio.....	52
Cuadro 14. Estimación de la CAA de las estaciones meteorológicas.....	58
Cuadro 15. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 70% para Frijol, estación 15001. .....	61
Cuadro 16. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 20% para Frijol, estación 15001. .....	61
Cuadro 17. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 70% para Haba, estación 15001. .....	62
Cuadro 18. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 20% para Haba, estación 15001. .....	62
Cuadro 19. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 70% para Maíz, estación 15001. .....	63
Cuadro 20. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 20% para Maíz, estación 15001. .....	63
Cuadro 21. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 70% para Papa, estación 15001. .....	64
Cuadro 22. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 20% para Papa, estación 15001. .....	64
Cuadro 23 Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 70% para Trigo, estación 15001. .....	65
Cuadro 24. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 20% para Trigo, estación 15001. .....	65
Cuadro 25. Deficiencias de Humedad a dos niveles de probabilidad (70 y 20%).....	67
Cuadro 26. Excesos de humedad a dos niveles de probabilidad (70 y 20%).....	72
Cuadro 27. Categorías del Índice de satisfacción de necesidades hídricas.....	76

Cuadro 28. Índice de Satisfacción de necesidades hídricas para los cultivos de Frijol, Haba, Maíz, Papa y trigo a dos niveles de probabilidad de lluvia..... 77

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de un estoma (FAO, 2006) .....	9
Figura 2. Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual (FAO, 2006). .....	10
Figura 3. Determinación de la capacidad de almacenamiento por medio de la textura del suelo (Fuente: Norero, 1976). .....	16
Figura 4. Balance de agua en el suelo de la zona radicular (FAO, 2006). .....	20
Figura 5. Localización de la cuenca de México .....	29
Figura 6. Kc medio en la fase inicial, en función del nivel medio de la ETo (durante la fase inicial) y la frecuencia de riego o de unas lluvias apreciables (FAO, 1976) .....	42
Figura 7. Gráfica de Kc para Frijol. ....	43
Figura 8. Gráfica de Kc para Papa. ....	44
Figura 9. Gráfica de Kc para Trigo. ....	45
Figura 10. Gráfica de Kc para Haba .....	46
Figura 11. Gráfica de Kc para Maíz. ....	47
Figura 12. Análisis Frecuencial de Lluvias, estación 15001. ....	50
Figura 13. Análisis Frecuencial de Lluvias, estación 15106. ....	51

# 1 INTRODUCCIÓN

La extensa variación de condiciones climáticas en este país ha sido un factor limitante para poder establecer cultivos sustentables en regiones donde solo se practica la agricultura de autoconsumo.

La agricultura en México, sigue siendo predominantemente de temporal, esta acción hace que se tenga una total dependencia de los elementos climáticos del medio ambiente, por tal razón es de suma importancia el estudio de las variaciones de estos elementos a través del tiempo, con el fin de determinar las condiciones óptimas en el cual pueda desarrollarse el cultivo satisfactoriamente.

En el presente trabajo de investigación se realizó una caracterización agroclimática de la región de la cuenca de México con base en un estudio de Balance Hídrico a fin de planear e implementar nuevas tecnologías que ayuden a tratar de controlar las adversidades climatológicas que afecten a los cultivos.

Siempre existen muchas interrogantes antes de poder introducir un cultivo en una región, es por ello que con una zonificación se busca encontrar las zonas propicias para el desarrollo de los cultivos tratando de optimizar la productividad de los mismos.

El objetivo final de este trabajo de investigación es proporcionar conocimientos climáticos a productores, investigadores y/o estudiantes, interesados en el estudio realizado en esta región, para poder conocer que cultivos se adaptan mejor a las condiciones de un lugar.

Con la ayuda de un Sistema de Información Geográfico (SIG) se propusieron zonas aptas para el establecimiento de frijol, papa, trigo, haba y maíz estas zonas se crearon en base a excesos y deficiencias de humedad que presentaban los cultivos en la región de estudio.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GENERAL**

- Realizar la zonificación agroclimática de la cuenca de México

### **2.2 PARTICULARES**

- Determinar las zonas más aptas para el establecimiento de los cultivos de Frijol, Haba, Maíz, Papa y Trigo bajo las condiciones climáticas de la Cuenca de México.
- Determinar por medio del Balance Hídrico simplificado y con lluvia a dos niveles de probabilidad, los excesos y deficiencias de cada uno de los cultivos estudiados.
- Representar la variabilidad espacial del Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas de cada uno de los cultivos estudiados.
- Generar mapas para representar las zonas con potencial de adaptación de los cultivos con ayuda del programa ArcView 3.2.

## **3 HIPÓTESIS**

### **3.1 GENERALES**

- Mediante la zonificación agroclimática es posible establecer las zonas de mayor aptitud para el desarrollo de los cultivos de interés.
- Mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica se podrá elaborar la cartografía de zonas de mayor aptitud para el desarrollo de los cultivos.

### **3.2 PARTICULARES**

- El balance hídrico permitirá conocer los periodos de excedencia y deficiencia de agua, para los cultivos bajo estudio en la cuenca de México.
- La cartografía del índice de satisfacción de necesidades hídricas permitirá identificar las zonas con diferente aptitud para la producción de los cultivos de interés en la cuenca de México.

## **4 REVISIÓN DE LITERATURA**

### **4.1 Zonificación agrícola**

La zonificación agrícola está conformada por la serie de estudios encaminados al establecimiento de zonas propicias para el desarrollo de un cultivo.

El uso de la zonificación agrícola o zonificación de cultivos se puede interpretar como una estrategia para incrementar la producción agrícola a través del manejo de los cultivos ya existentes, y así optimizar su área de producción, o introducir nuevos cultivos en lugares con características ambientales bien definidas. A través de la zonificación es posible introducir nuevas técnicas de producción, y de control de plagas y enfermedades.

Es decir, la zonificación se puede ver como la búsqueda de áreas adecuadas para el establecimiento de un cultivo, o bien la búsqueda de cultivos para un área determinada, tratando de optimizar la productividad de los mismos (Bárcenas, 2002).

La zonificación divide la superficie en unidades más pequeñas en base a la distribución de suelo, relieve y clima. El nivel de detalle en el que se define una zona depende de la escala del estudio y en ocasiones de la capacidad de los equipos para el procesamiento de los datos (FAO, 1997).

#### **4.1.1 Tipos de zonificación**

Primault, citado por Romo (1985) y Martínez (1994), identifica dos grandes grupos de métodos de zonificación: los agroclimáticos y los agroecológicos. El reconocimiento agroclimático se realiza con escalas relativamente grandes (1: 200,000), para dar seguimiento a la evolución de parámetros meteorológicos básicos y su relación con grupos de cultivos con la misma capacidad de respuesta al clima, para enseguida dar paso a estudios agroclimáticos más detallados de unos cuantos kilómetros cuadrados, donde se analizan parámetros meteorológicos más específicos con relación a una especie vegetal o

grupo de variedades. Después de ese nivel, las variaciones espaciales dependen de factores ecológicos como suelo, topografía, biota, etc., y factores agrotécnicos, los cuales pueden proporcionar información a nivel de hectárea o de área.

Romo (1985), menciona además los métodos integrales que incluyen tanto el marco biofísico como el marco socioeconómico, ya que los métodos agroclimáticos y agroecológicos abarcan apenas el marco biofísico de la zonificación, descuidando los aspectos socioeconómicos que constituyen un marco de referencia importante a considerar.

Por la forma en que abordan el problema, las metodologías pueden ser deductivas o inductivas. Una zonificación deductiva parte de la hipótesis de que los cultivos darán la misma respuesta en cualquier área con climas y suelos similares. Consiste en caracterizar los cultivos por sus tipos agroclimáticos y edáficos, para su posterior ubicación en los espacios geográficos que mejor cubran sus requerimientos de clima y suelo. Con este tipo de zonificación se responde al donde y cuando, pero para responder al cuanto se tiene que recurrir al proceso inductivo. La zonificación inductiva consiste en obtener una función de producción con base en experimentos o en datos estadísticos, cuantificando el incremento o decremento de los rendimientos y extrapolando geográficamente la función.

## **4.2 Precipitación**

La precipitación es el elemento climático que presenta mayor influencia en la producción agrícola, sobre todo en la agricultura de temporal donde es determinante, pues es la única fuente de ingreso de agua en el suelo. Por lo cual su conocimiento y análisis es fundamental en los Distritos de Desarrollo Rural para una mejor planeación de la producción (Yescas, 2004).

La precipitación se utiliza para designar a toda el agua que proviene de las nubes y cae a la tierra en cualquiera de sus estados físicos.

La distribución de la lluvia es muy irregular, es por esta razón que no puede estimarse con otras variables meteorológicas; ya que la cantidad de lluvia varía en el espacio y en el tiempo. Sin embargo, esa aparente complejidad, desaparece cuando se analiza la latitud, dirección de los vientos dominantes, distancia al mar y relieve del suelo. En México los extremos de precipitación están en Sonora y Baja California con el valor más bajo (< 50 mm de agua) y el valor más alto en Oaxaca (alrededor de 5 400 mm de agua).

La cantidad de lluvia se expresa como la altura en milímetros de una capa de agua que se forma sobre un suelo completamente horizontal e impermeable, suponiendo que sobre dicha capa no se produce ninguna evaporación. Esta cantidad de lluvia se mide con pluviómetros y pluviógrafos (Yescas, 2004).

### **4.3 Temperatura**

La temperatura es una de los elementos meteorológicos más importantes para los cultivos. Reviste enorme importancia para el crecimiento, desarrollo y rendimiento de todas las plantas.

Las plantas, para su crecimiento y desarrollo, exigen del régimen de temperatura básicamente dos cosas:

- Que no presenten valores extremos de la temperatura (máximos o mínimos) que impidan su crecimiento y en último caso su sobrevivencia.
- Que las temperaturas medias diarias sean tales que el “consumo” de temperatura por las plantas sea satisfecho en un lapso razonable de tiempo de manera que su rendimiento no se vea disminuido (Romo y Arteaga, 1989).

#### **4.4 Proceso de evapotranspiración**

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (FAO, 2006).

En toda superficie cultivada se produce una pérdida continua de agua (durante un intervalo de tiempo dado), cuyo destino es el aire. Puede producirse directamente desde la superficie del suelo, o bien, a través del sistema conductor de la planta. En ambos casos, se trata del mismo proceso físico que implica un cambio de estado (de líquido a vapor) con el consiguiente consumo de energía. La dificultad para evaluarlas separadamente, obliga a considerarlas de manera conjunta, surgiendo así el concepto de evapotranspiración (Ángeles, 2000).

##### **4.4.1 Evaporación**

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, suelos y vegetación mojada.

Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación.

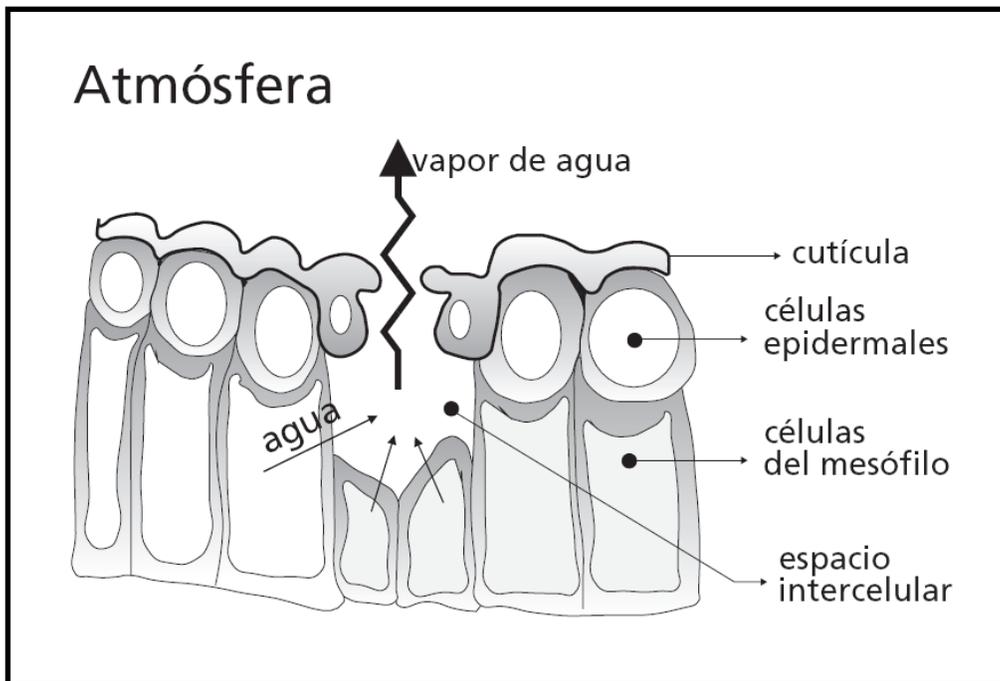
Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación. Lluvias frecuentes, el riego y el ascenso capilar en un suelo con manto freático poco profundo, mantienen mojada la superficie del suelo. En zonas en las que el suelo es capaz de proveer agua con velocidad suficiente para satisfacer la demanda de la evaporación del suelo, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas.

Sin embargo, en casos en que el intervalo entre la lluvia y el riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, el contenido en agua en los horizontes superiores disminuye y la superficie del suelo se seca. Bajo estas circunstancias, la disponibilidad limitada del agua ejerce un control sobre la evaporación del suelo.

En ausencia de cualquier fuente de reabastecimiento de agua a la superficie del suelo, la evaporación disminuye rápidamente y puede cesar casi totalmente en un corto lapso de tiempo (FAO, 2006).

#### **4.4.2 Transpiración**

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Éstos son pequeñas aberturas en las hojas de las plantas a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera (Figura 1). El agua, junto con algunos nutrientes, son absorbidos por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática.



**Figura 1. Representación esquemática de un estoma (FAO, 2006)**

Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales.

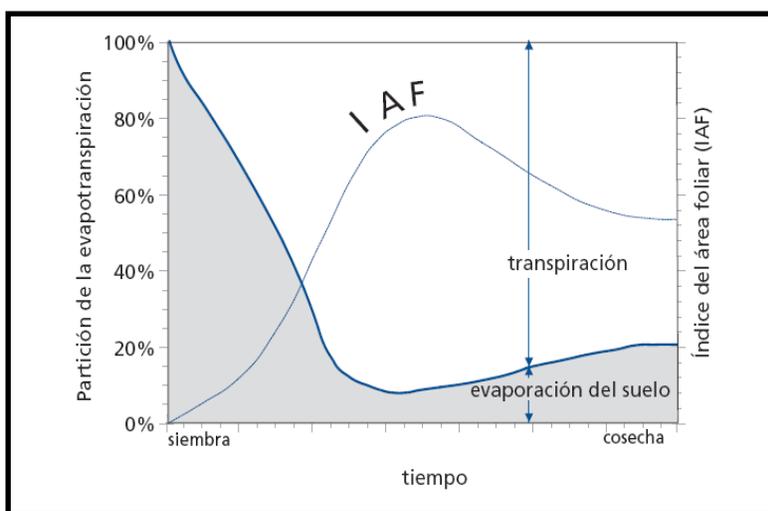
La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo.

Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración (FAO, 2006).

### 4.4.3 Evapotranspiración (ET)

La evapotranspiración de referencia es la máxima cantidad de agua que pierde el sistema suelo planta, cuando se tiene el cultivo en pleno desarrollo de porte bajo y cobertura total y cuando no existe limitación de agua en el suelo y para un clima dado (Ramírez, 2007).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando éste cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En la Figura 2 se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del de 90% de la ET ocurre como transpiración (FAO, 2006).



**Figura 2. Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual (FAO, 2006).**

Cuando se trata de determinar la ET de un cultivo, mediante una función matemática que la relacione con las variables más importantes de las que depende, (radiación neta, proceso advectivo, velocidad del viento, presión de vapor, disponibilidad de agua, y geometría de la superficie evaporante), resulta complicado encontrar parámetros simples que descubran los factores del cultivo (geometría de la superficie y disponibilidad de agua en la misma).

Intentando salvar esta dificultad, se idearon los conceptos auxiliares de evapotranspiración potencial (ETP) y, más tarde, el de evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo). Ambas se refieren a una ET cuyo valor está condicionado solo por variables meteorológicas.

Penman definió en 1956 la ETP como “la cantidad de agua transpirada por unidad de tiempo, por un cultivo completamente verde, de porte bajo, cubriendo totalmente la superficie del suelo, de altura uniforme y con disponibilidad permanente y suficiente de agua en el suelo”.

La ETo se define como “la tasa a la cual el agua, si está disponible, es removida del suelo y de la superficie de la planta, de un cultivo específico (tipo gramínea de 8 a 15 cm. o alfalfa de 30 a 50 cm.) llamado arbitrariamente de referencia (Ángeles, 2000).

#### **4.5 Evapotranspiración de Referencia Método Thornthwaite (ETo)**

Los cálculos de Thornthwaite (1948) están basados en la determinación de la Evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes. Este método es muy empleado en Hidrología y en la estimación del Balance Hídrico para Climatología e Hidrología de Cuencas.

#### **4.6 Evapotranspiración máxima (ETM)**

Es la máxima cantidad de agua que pierde en cada una de sus etapas un cultivo y la humedad del suelo es adecuada (Ramírez, 2007).

La Evapotranspiración Máxima (ETM) se refiere a aquellas condiciones en que el agua es la conveniente para un crecimiento y desarrollo sin limitaciones, la ETM representa la tasa de evapotranspiración máxima de un cultivo, que crece en grandes campos y en condiciones óptimas de ordenación agronómica y de riego (Doorenbos y Kassam, 1979).

La ETM es la suma de la transpiración del cultivo y de la evaporación de la superficie del suelo. Con una cubierta sombreada completa la evaporación es insignificante pero durante la primera fase de crecimiento la evaporación de la superficie del suelo puede ser considerable, especialmente cuando esté húmeda la mayoría del tiempo debido al riego y a la lluvia (Doorenbos y Pruitt, 1977).

#### **4.7 Coeficiente de cultivo (kc)**

Los métodos para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) permiten predecir los efectos del clima en la ET<sub>o</sub>. Para tener en cuenta los efectos de las características del cultivo sobre sus necesidades de agua, se presentan unos coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>), con objeto de relacionar la ET<sub>o</sub> con la evapotranspiración (ET) del cultivo. El valor de K<sub>c</sub> representa la evapotranspiración de un cultivo en condiciones óptimas y que produzca rendimientos óptimos (FAO, 1990).

Los factores que repercuten en el valor del coeficiente de cultivo, son principalmente las características del cultivo, las fechas de plantación o siembra, el ritmo de desarrollo del cultivo, la duración del periodo vegetativo, las condiciones climáticas y especialmente durante la primera fase de crecimiento la frecuencia de las lluvias o del riego.

#### **4.8 Humedad en las plantas**

El agua es el principal componente de las plantas, en algunos de cuyos órganos representa más del 90% en peso. Actúa como disolvente y medio de transporte de gases, minerales y otras sustancias esenciales para la vida vegetal y es asimismo un reactivo de procesos fundamentales, como la fotosíntesis (Pizarro, 1990).

El vapor de agua de la atmósfera llega al suelo, ya sea por condensación en forma de lluvia o por congelación en forma de nieve. El ciclo es muy simple, el agua se infiltra en las capas del suelo, se almacena quedando retenida, drena a través y por debajo de él, y finalmente regresa a la atmósfera por la evapotranspiración, evaporación directa desde mar o tierra y por transpiración, quedando una gran cantidad formando parte del planeta y solo una pequeña parte es aprovechada por el hombre.

La cubierta vegetal intercepta en parte la precipitación antes de entrar en el suelo. Además de proteger al suelo del excesivo calentamiento o enfriamiento diurno o estacional, reduciendo a la vez las pérdidas de humedad por evaporación ocasionada por el viento, frenado en parte por el obstáculo que presenta la vegetación aumentando la fuerza de rozamiento.

Una parte de la precipitación que queda sobre las hojas vuelve a la atmósfera por evaporación, siendo evidentemente menor sobre hojas y arbustos que sobre praderas donde fluye libremente el viento. Las raíces hacen el suelo más permeable y favorecen así el ciclo hídrico (Aguilera y Martínez, 1996).

#### 4.8.1 Humedad aprovechable por las plantas

Ésta se define como la diferencia de contenido de humedad entre la capacidad de campo y el porcentaje de marchitamiento permanente y se considera que a capacidad de campo la humedad aprovechable es de 100%, y a punto de marchitamiento será 0 %. Por lo tanto la lámina máxima que se debe aplicar para humedecer un suelo a una profundidad (Pr), sin desperdiciar agua será determinada por la Ecuación (1).

$$L = (Ps_{cc} - Ps_{pmp}) \times Da \times Pr \text{----- Ecuación ( 1)}$$

Donde:

$L$  = Lámina de retención máxima, en cm.

$Ps_{cc}$  = Porcentaje de humedad a capacidad de campo, %.

$Ps_{pmp}$  = Porcentaje de humedad a punto de marchitamiento permanente, %.

$Da$  = Densidad aparente, adimensional.

$Pr$  = Profundidad radicular, cm.

Desde luego que se hace la consideración de que la humedad se ha dejado descender hasta PMP antes de aplicar el agua. En la práctica estas constantes se relacionan, con una aproximación aceptable, de la siguiente manera:

Se puede considerar que la capacidad de campo de un suelo tiene un valor aproximadamente a 0.5 del contenido de humedad a saturación.

Por otra parte la capacidad de campo es aproximadamente dos veces mayor que el valor del punto de marchitamiento permanente, por tanto, si se supone que un suelo contiene un porcentaje de humedad, a saturación de 80%; para fines prácticos la capacidad de campo será alrededor del 40% y el punto de marchitamiento permanente del 20% aproximadamente De la Peña (1977) y Posadas (1978) citados por (Aguilera y Martínez, 1996).

## **4.9 Humedad en el suelo**

El suelo está constituido por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida se compone de partículas minerales y de materia orgánica; esta última representa un pequeño porcentaje salvo en el caso de los suelos orgánicos. El espacio no ocupado por la fase sólida constituye los poros del suelo, que están ocupados por las fases líquida y gaseosa.

Los poros del suelo están ocupados por agua y por aire, en proporciones variables según el estado de humedad. Cuando todos los poros están ocupados por agua, se dice que el suelo está saturado, si el drenaje continúa, llega un momento en que el suelo no pierde más agua en este caso se dice que el suelo está a capacidad de campo (CC), cuando la película de agua que rodea a las partículas se hace cada vez más fina y a medida que el contenido de humedad disminuye, se hace más difícil la absorción de agua por las raíces, hasta que se alcanza un estado denominado punto de marchitez (Pizarro, 1990).

### **4.9.1 Capacidad de almacenamiento del suelo (CA)**

La principal fuente de agua disponible para las plantas es aquella retenida en el volumen de suelo donde se encuentren las raíces. Toda la humedad de suelo no está disponible para las plantas, el agua disponible es comúnmente considerada como aquella porción retenida entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) (Arteaga y Vázquez, 2001).

Cuando únicamente se conoce la textura del suelo, para determinar la humedad disponible se puede hacer uso de la Figura propuesta por Norero (1976), a la cual se entra con los porcentajes de arena, limo y arcilla del suelo en cuestión y se obtiene la fracción volumétrica de agua aprovechable (*f<sub>vaa</sub>*). Al multiplicar la *f<sub>vaa</sub>* por la profundidad del suelo (*P<sub>r</sub>*) se obtiene la fracción volumétrica total de agua aprovechable (*FVAA*), o la capacidad de almacenamiento del suelo, la cual se expresa en lámina de agua (mm).

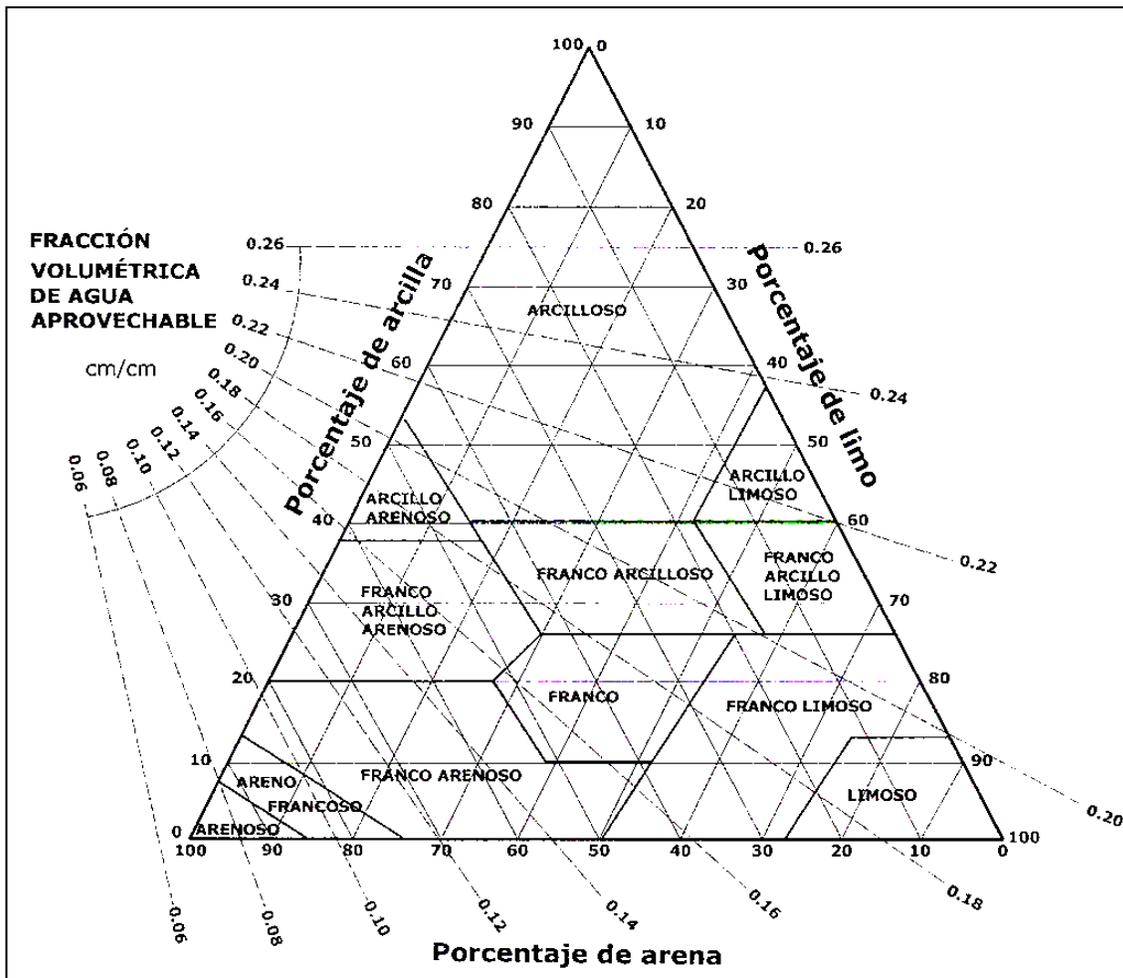


Figura 3. Determinación de la capacidad de almacenamiento por medio de la textura del suelo (Fuente: Norero, 1976).

#### **4.10 Análisis Temporal de los Datos Meteorológicos: Análisis Frecuencial de Lluvias**

La metodología propuesta para el estudio de las condiciones hídricas de los cultivos se basa en el análisis frecuencial de la precipitación, a lo largo del año, por periodos elementales de una duración de diez días. Este tipo de análisis permite determinar, a un nivel de riesgo determinado, un periodo de cultivo, esto es, a la vez, un criterio determinante en la elección de los cultivos que mejor se adapten a las condiciones agroclimáticas imperantes en la región analizada.

##### **4.10.1 Análisis Frecuencial de la precipitación**

De un año a otro la precipitación es sumamente variable, sin importar el periodo de tiempo que se considere para su estudio. Sólo por medio del análisis frecuencial, se podrá evaluar el aspecto aleatorio del fenómeno y determinar el riesgo climático causado por la fluctuación interanual de la precipitación. El año es dividido en periodos elementales de diez días, denominados décadas, para cada década se determina la frecuencia de que la lluvia no sobrepase la mitad de la evapotranspiración de referencia,  $E_{To}$ . Esta frecuencia se calcula a partir de los registros de lluvia a nivel diario.

Un periodo elemental de diez días representa una duración estándar, que toma en cuenta la capacidad de almacenamiento del agua por parte del suelo.

La evapotranspiración de referencia,  $E_{To}$ , representa aproximadamente el requisito óptimo en agua de un cultivo bien desarrollado y cubriendo bien el suelo. Se puede considerar que la mitad de la evapotranspiración de referencia ( $E_{To}/2$ ), representa el requisito mínimo para obtener un rendimiento satisfactorio (pero no necesariamente óptimo) (Rojas, 1985).

#### **4.10.2 Aplicación práctica en la agricultura del Análisis Frecuencial de Lluvias**

El interés práctico de las curvas obtenidas por medio del análisis frecuencial de lluvias, radica en el hecho de que ellas permiten comparar el clima de una estación dada, con todos los ciclos vegetativos de todos los cultivos posibles para la región, mientras que el único factor limitante sea el hídrico.

#### **4.11 Determinación del periodo de cultivo**

Las curvas obtenidas del análisis frecuencial, pueden ser utilizadas para determinar la época de cultivo (inicio, duración y fin), a un cierto nivel de probabilidad. Se escoge generalmente el valor de 0.75, que significa una frecuencia de ocurrencia del fenómeno 3 años cada 4 y corresponde un riesgo aceptable en la agricultura.

El periodo de cultivo comienza con la primera década, donde la frecuencia sobrepasa el valor de 0.75 y termina con la primera década con una frecuencia inferior a 0.75. Si una década con una frecuencia inferior a 0.75 se encuentra entre dos décadas, con valor superior a 0.75, se considera que no hay interrupción del periodo de cultivo. Pueden aparecer evidentemente varios periodos del cultivo (generalmente no más de dos) (Rojas, 1985).

##### **4.11.1 Estación de crecimiento**

La determinación del período de crecimiento de un cultivo, definido éste como el número de días durante el año en los que existe disponibilidad de agua y temperaturas favorables para su desarrollo, es un buen indicador de la aptitud de un lugar para la producción de una especie determinada.

El cálculo del periodo de crecimiento de un cultivo permite definir él o los ciclos de cultivo que se pueden presentar en una zona (en el caso de los cultivos anuales), así como las características de manejo agronómico más adecuadas para optimizar los niveles de producción.

Especies que son sensibles a las bajas temperaturas, a las deficiencias de humedad o bien a los excesos y que requieren de determinada duración del día para su floración y fructificación, demandan mayor precisión en la determinación del periodo de crecimiento. La determinación del comienzo del periodo de crecimiento se basa en el inicio de la estación lluviosa. Las primeras lluvias caen sobre un suelo que está generalmente seco en la superficie y que tiene un gran déficit de humedad en el perfil. En ausencias de reservas de humedad del suelo, la siembra, la germinación de la semilla y el crecimiento de los cultivos están en función de la cantidad y de la distribución de las primeras lluvias.

#### **4.12 Balance hídrico**

El Balance Hídrico es la diferencia entre la precipitación recibida por el cultivo y el agua perdida por éste y el suelo. El agua retenida por el suelo a disposición del cultivo también se toma en cuenta para el cálculo (Frére y Popov, 1986).

El concepto de balance de agua fue introducido por Thornthwaite (1944) y después usado por el mismo para la clasificación de climas (1948). Thornthwaite y Mather (1966), consideraron que la humedad del suelo es un equilibrio entre la precipitación que penetra al mismo y que sale en forma de evaporación de agua del suelo y la transpiración de la vegetación.

Chang (1968), señala que el rápido progreso en los estudios del concepto de evapotranspiración potencial condujo al desarrollo de las técnicas de balance de agua como un método para estimar la humedad del suelo. Este enfoque ha sido muy recomendado por el bajo costo del equipo, simplicidad en la medida y razonable precisión en los resultados.

Grassi (1968), consideró que al confrontar los valores de evapotranspiración potencial de un determinado periodo, con la precipitación que ocurrió durante este, se pueden conocer las posibles deficiencias o los sobrantes de agua. Además dado que el suelo tiene la capacidad de almacenar agua, la capacidad de reserva de éste debe tomarse en cuenta en el balance hídrico.

Norero (1976), conceptualizó esta técnica como la formulación matemática de la ley de la conservación de la materia, en este caso del agua en el suelo y según lo cual, la cantidad de agua almacenada en un volumen determinado debe igualar a la diferencia entre los ingresos y egresos de agua.

Baldion (1985), la definió como la utilización de los datos reales de precipitación y de información climatológica para el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos.

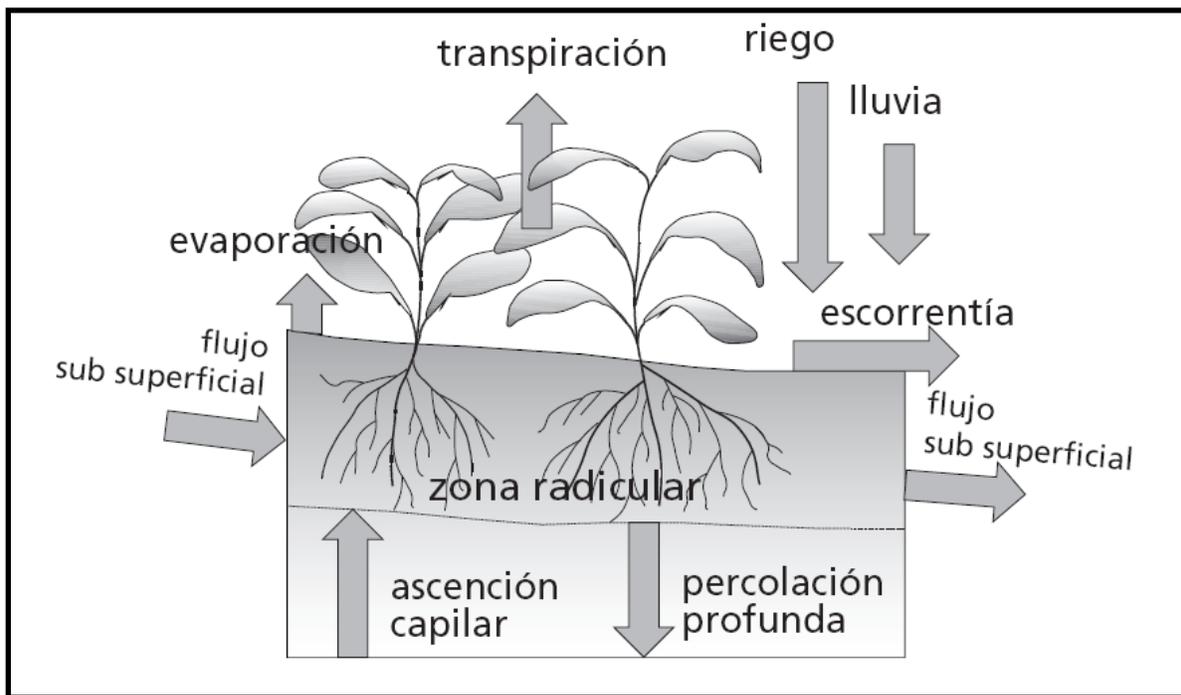


Figura 4. Balance de agua en el suelo de la zona radicular (FAO, 2006).

Los componentes del balance hídrico, donde se observan los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo (Figura 4). El riego y la precipitación proporcionan agua a la zona radicular. Parte del riego y la precipitación pueden perderse por escurrimiento superficial, y percolación profunda la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro o fuera de la zona radicular. Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes

pronunciadas, normalmente los valores del flujo sub-superficial hacia adentro y el flujo sub-superficial hacia fuera de la zona radicular son mínimos y pueden no ser considerados. La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular.

#### 4.12.1 Ecuación general del balance hídrico.

Los modelos generales presentados por diferentes autores entre ellos; Thornthwaite (1944), Pruit (1958), Grassi (1968), Norero (1976), Jackson (1977), Palacios (1980) y Baldion (1985), del balance hídrico son bastantes semejantes, las posibles diferencias existen en las suposiciones propuestas por cada uno de ellos que en algunos casos simplifican su cálculo.

En el estudio de los aportes, el movimiento y las salidas de agua de una determinada zona o volumen de suelo (país, región, cuenca, parcela) constituyen la esencia de la ley de la conservación o del balance hídrico, todo lo cual se puede sintetizar en la Ecuación (2).

$$P_i + R_i + MF_i - (ET_i + ES_i + PE_i) = \pm AHS_i \text{ ----- Ecuación ( 2)}$$

Donde:

##### INGRESOS

$P_i$  = precipitación

$R_i$  = Riego

$MF_i$  = Manto Freático

##### EGRESOS

$ET_i$  = Evapotranspiración

$ES_i$  = Escurrimiento

$PF_i$  = Percolación

$AHS_i$  = Cambio de la humedad del suelo (HA) del periodo  $HA_{i-1}$  al  $HA_i$

Todos los componentes del balance que se muestran en la Ecuación (2), se expresan convenientemente como lámina de agua (equivalente a un volumen por unidad de área) se usa el mm, como unidad común.

#### 4.12.2 Balance hídrico simplificado

Uno de los ingredientes básicos para el cálculo del balance hídrico en el sistema suelo-planta-atmósfera es el índice R o relación entre el agua suministrada por el suelo y el agua requerida, se puede considerar a dicho índice como una relación entre la evapotranspiración real y la de referencia,  $R=ETR/ET_o$ . Se reportan varios modelos incluso simulados, para representar la relación entre R y el porcentaje de humedad en el suelo, indicando cierta controversia entre los distintos autores.

La ecuación general de balance hídrico se puede reducir y obtener la ecuación del Balance Hídrico Climático Simplificado que se representa por la Ecuación (3).

$$HA_i = HA_{i-1} + P_i - ET_{o_i} \text{----- Ecuación ( 3)}$$

La cual está sujeta a:

Si;  $HA_{i-1} + P_i - ET_{o_i} < 0$  se tienen deficiencias ( $DE_i$ )----- Ecuación ( 4)

Si;  $0 < HA_{i-1} + P_i - ET_{o_i} \leq CA$  se almacena humedad en el suelo ( $HA_i$ )---- Ecuación ( 5)

Si;  $HA_{i-1} + P_i - ET_{o_i} > CA$  se presenta excesos ( $EXC_i$ )----- Ecuación ( 6)

La Ecuación (7) representa el balance hídrico agrícola simplificado:

$$HA_i = HA_{i-1} + P_i - ETM_i \text{----- Ecuación ( 7)}$$

Donde:

$ETM_i$  = Evapotranspiración máxima de un cultivo en el periodo i.

### 4.12.3 Intervalo de tiempo

Existen algunas opciones sobre el intervalo de tiempo utilizado para el cálculo del balance hídrico.

Grassi (1968), opinó que si se tiene en cuenta, que los datos climáticos se publican en promedios mensuales generalmente éste, es el intervalo que se adopta. Sin embargo, dado que la evapotranspiración es una variable agroclimática generada y los elementos climáticos de los cuales depende (radiación, temperatura, etc.), son fenómenos continuos y la precipitación es un fenómeno aleatorio, puede haber diferencias notables en el resultado de éste, al considerar periodos grandes o pequeños. Un balance hídrico con intervalos pequeños (cinco, diez o siete días) permitirá detectar periodos de sequía, que afectan sensiblemente el rendimiento de los cultivos.

Las diferencias entre la precipitación y la evapotranspiración potencial a nivel mensual no se detectan, mientras que a nivel pentadal (cinco), semanal (siete), o decenal (diez días) pueden manifestarse aún en un periodo de lluvia.

Doorenbos y Pruitt (1976), señalaron que un periodo o intervalo con el cual se haga el balance hídrico es importante, ya que periodos demasiados largos pueden encubrir la existencia de breves fases de escasez de agua. Al trabajar con datos mensuales, puede parecer que las lluvias mensuales satisfacen la evapotranspiración máxima del cultivo mensual, pero como las lluvias no están distribuidas uniformemente a lo largo de todo el mes, podrán ocultarse breves intervalos de sequías.

Sin embargo el balance hídrico a nivel diario puede resultar poco práctico. Hay que tener presente que al utilizar el balance mensual en lugar del diario, puede producir resultados aceptables a efectos de planificación global, pero que dista mucho de ser realista para su uso en lo que se refiere a la concepción detallada y al funcionamiento de obras de riego y drenaje.

Por lo anterior se puede decir que los balances hídricos se pueden calcular para periodos; diarios, pentadales, semanales, decadales, mensuales o anuales, lo cual dependerá de la finalidad de éste.

Para fines operativos a corto o mediano plazo se pueden utilizar los diarios, pentadales, semanales o decenales; mientras que para la planificación del manejo de los recursos hídricos a largo plazos se requieren a nivel mensual o anual.

Dado que el balance hídrico general de un área y la necesidad individual de riego o drenaje de cada cultivo puede calcularse para diferentes intervalos de tiempo y con datos promedios o probabilísticos de diferentes series de registros y de capacidades de almacenaje de agua en el suelo, es posible a través de este análisis, detectar necesidades permanentes de riego o drenaje integral y necesidades temporales o eventuales de éstos.

El riego o el drenaje integral generalmente se justifican cuando aparece un déficit o exceso bien marcado de varios meses, durante los cuales no se puede realizar cultivos sin riego o drenaje; el balance hídrico con valores climáticos mensuales los señalará generalmente con toda claridad.

Para el riego o drenaje temporal, la diferencia o el exceso requerirán un análisis más detallado, en lapsos más cortos para individualizar estos posibles periodos.

Hay que resaltar que en las zonas húmedas tropicales para la producción de los cultivos se requieren buenas obras que regulen el drenaje, lo cual se puede detectar como ya se indicó con balances a nivel mensuales, pero además es importante detectar periodos breves de sequías que se pueden presentar en etapas críticas de los cultivos que disminuirán el rendimiento de éstos si no se les aplica un riego de auxilio. Estos intervalos breves también son importantes para definir fechas de siembra o de cosecha, lo cual se determinará con balances en periodos cortos.

### **4.13 Precipitación efectiva**

Es indispensable conocer la frecuencia y el volumen de las lluvias para poder establecer un cultivo, ya que no toda la lluvia que cae resulta efectiva, parte de ella se pierde en forma de escorrentía, percolación profunda o evaporación.

La lluvia efectiva no es sino una parte de la lluvia total. En regiones de lluvias fuertes e intensas puede ocurrir que solamente entre y quede almacenada en la rizosfera una parte de ellas y, por consiguiente, la eficacia de la lluvia será baja. En el caso de lluvias frecuentes y ligeras la eficacia puede ser más alta (FAO, 1990).

#### **4.13.1 Probabilidad de lluvia**

Hay varios métodos para determinar la distribución de frecuencias de las lluvias, la mayoría de ellos producirán resultados similares en el centro o cerca del centro de la distribución, pero valores distintos en los extremos alto y bajo. Así pues, la elección del método dependerá de la finalidad para que vallan a utilizarse los datos (FAO, 1990).

#### **4.13.2 Distribución Normal**

La distribución normal es una de las más sencillas que se utiliza para deducir las probabilidades de lluvia. Las frecuencias de la distribución Normal de una muestra numerosa se expresa por la formula Gauss-Laplace y al graficarlas, la curva obtenida tiene forma típica de campana (Muñoz, 2002).

Su función de densidad de probabilidad  $f(x)$  está dada por la Ecuación (8).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} ; X \in (-\infty, \infty) \text{----- Ecuación ( 8)}$$

Donde:

$\mu$ , es la media poblacional

$\sigma^2$ , es la varianza poblacional

A partir de datos provenientes de una muestra aleatoria de tamaño  $n$ , se puede usar la Ecuación (9).

$$\bar{X} = \text{Media aritmética muestral} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \text{ como estimador de } \mu \text{ ---- Ecuación (9)}$$

Donde:

$X_i$ , datos de lluvia

$n$ , número de datos de lluvia

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n}} \text{----- Ecuación (10)}$$

$S$ , Desviación estándar muestral, como estimador de la desviación estándar poblacional.

Para hacer más sencillo el cálculo de la función Normal se hace una estandarización cuyo valor se determina en base a la Ecuación (11), asumiendo que el tamaño de la muestra es mayor de 30 y se tiene una distribución normal.

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \text{----- Ecuación (11)}$$

Donde:

$Z$ , es el valor estandarizado de la Distribución Normal, existen tablas para determinar la probabilidad del valor de  $Z$ .

### 4.13.3 Distribución raíz cubica

Esta distribución ha sido usada con buen éxito sobre todo para datos de precipitación en periodos donde no se presenta una elevada cantidad de datos igual a cero (Muñoz, 2002). Este tipo de distribución también es una transformación de la función normal.

$$Z = \frac{Y_i - \bar{Y}_i}{S} \text{----- Ecuación (12)}$$

Donde:

$$Y_i = \sqrt[3]{X_i} \text{----- Ecuación (13)}$$

$X_i$  = Datos de lluvia

Sustituyendo  $Y_i$  media en la Ecuación (9) en lugar de la  $X_i$  se obtiene la media aritmética. Sustituyendo  $Y_i$  media y  $Y_i$  en la Ecuación (10) en lugar de la  $X_i$  se obtiene la desviación estándar.

### 4.14 Índice de satisfacción de las necesidades hídricas (ISNH)

Indica de manera acumulativa la amplitud en que las necesidades hídricas de los cultivos anuales han sido satisfechas en cada fase de la estación de crecimiento del cultivo, o dicho de otro modo, la razón entre la evapotranspiración efectiva y de referencia del cultivo (Frére y Popov, 1986).

El primer problema es determinar cuidadosamente las “fechas efectivas de siembra de los cultivos” para diversas estaciones o regiones. Mientras que es fácil establecer una fecha promedio de siembra a partir de datos climatológicos promedio, es muy importante notar que la fecha efectiva de siembra dependerá de las características de cada estación de lluvias, que puede anticipar o retrasar muchas semanas. El ISNH se calcula con la Ecuación (14), en donde se supone que la disponibilidad de agua en el suelo antes de la fecha de siembra será mayor que las necesidades hídricas de la planta durante la primera década de su emergencia.

Por lo tanto el Índice se toma como igual a 1.0 (ó 100) en el momento de la siembra. En caso de que se produzca un déficit, el índice mostrará una clara reducción (Frére y Popov, 1986).

$$I_i = I_{i-1} - \frac{Déficit_i}{\sum_1^n ETM} 100 \text{----- Ecuación (14)}$$

Donde:

$I_i$  = Índice de satisfacción de las necesidades hídricas.

$I_{i-1}$  = ISNH de la década anterior.

$Déficit_i$  = Déficit Hídrico de la década i.

$ETM$  = Evapotranspiración Máxima del cultivo.

El cálculo continuará década por década hasta la madurez del cultivo, correspondiente a la estación de crecimiento. Al final de la estación de crecimiento, el "ISNH" reflejará los estreses hídricos cumulativos sufridos por el cultivo década tras década; mientras más alto sea el Índice final, menor será el estrés hídrico, este índice está estrechamente vinculado al rendimiento final del cultivo (Frére y Popov, 1986).

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Descripción general de la zona de estudio

#### 5.1.1 Generalidades

La Cuenca de México es el nombre dado a la reunión de cuatro valles en la parte central del territorio mexicano, ubicada dentro de la región hidrológica No. 26 llamada Pánuco y la región XIII llamada “Valle de México y Sistema Cutzamala”, con elevaciones mínimas entre 2,150 msnm a 2,390 msnm en sus valles y de 5,800 msnm en los volcanes que la rodean, aunque con una elevación promedio de 2,900 msnm de las montañas que la cierran, dentro de la cual se hallan las ciudades de Pachuca, Tizayuca, Amecameca, Texcoco, Apan, entre otras y casi toda la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, con excepción de la zona perteneciente al municipio de Huixquilucan, esta cuenca está dividida políticamente entre cuatro entidades federativas y estas van de mayor a menor área respectivamente, Estado de México, Distrito Federal, Hidalgo y Tlaxcala con una pequeña zona en el estado de Puebla (Figura 5).



Figura 5. Localización de la cuenca de México

En algunas ocasiones se le confunde con la Cuenca del Valle de México la cual es solo una de cuatro cuencas que la forman.

En forma general la Cuenca de México se localiza entre el Cinturón Volcánico Transmexicano al sur, la Sierra Madre Occidental al oeste, la Sierra Madre Oriental al este y al norte la cierran las confluencias de ambas sierras.

La Cuenca de México se compone de cuatro valles, al sur se ubica el Valle de México, al noroeste el Valle de Cuautitlán, al nororiente el Valle de Apán y al norte el valle de Tizayuca.

### **5.1.2 Orografía**

La Cuenca de México está cerrada por la Sierra de Monte Alto, Sierra de las Cruces, Sierra del Ajusco, Sierra de Chichinautzin, Sierra Nevada, Sierra de Rio Frio, Sierra de Calpulalpan, Sierra de Tepozán, Sierra de Pachuca, Sierra de Tezontlalpan, Sierra de Tepetzotlán y Sierra de Monte Bajo. Internamente el valle de México y el valle de Cuautitlán son divididos por la Sierra de Guadalupe, entre el valle de Cuautitlán y el valle de Apán se ubica la sierra de Patlachique, entre el valle de Apán y el valle de Pachuca la sierra de Chichicauatla, mientras que entre el valle de Cuautitlán y el Valle de Pachuca no existen elevaciones importantes. Es de notar que las sierras que los dividen son discontinuas y nunca cierran los valles por completo, además dentro de estos valles se ubican pequeños sistemas montañosos siendo el más notable por la elevación la Sierra de Guadalupe en el valle de México.

### **5.1.3 Hidrografía**

Con un promedio de 700 milímetros de agua de lluvia anual, la región presenta un clima templado con valores promedio de entre 15 °C a 25 °C, con extremos de -2 °C en las zonas altas de las montañas que lo forman a los 36 °C en las zonas bajas, sobre todo en el área de la ciudad de México y la zona próxima a Huehuetoca, las precipitaciones se presentan

por lo regular de junio a septiembre; mientras el resto del año son escasas o nulas. Esta cuenca cuenta con depresiones cerradas de manera natural como el valle de México y el valle de Cuautitlán, que a fines del siglo XVIII fue abierta de manera artificial por el Tajo de Nochistongo para poder drenar al cauce del río Tula que a su vez drena a la Cuenca del Río Panuco, con quien forma la región hidrológica No. 26 Pánuco, drenando las aguas de los lagos de Chalco (2,203 msnm), Xochimilco (2,203 msnm), Texcoco(2,200 msnm), Zumpango (2,206 msnm) y Cuautitlán (2,206 msnm), que causaban repentinas inundaciones a la ciudad de México que se hallaba en el lago de Texcoco, que era el lago de menor nivel del sistema que además era un lago de aguas saladas por no tener forma de vaciar su contenido y presentar solo el fenómeno de evaporación de sus aguas.

Las fuentes de recarga del agua subterránea en la cuenca se derivan, en gran medida, de las precipitaciones infiltradas en el subsuelo y del agua de nieve derretida en las montañas y cerros que rodean el valle de México y el de Pachuca; este flujo se desplaza en forma de una corriente subterránea hacia las zonas menos elevadas. Las corrientes y depósitos de agua subterránea han originado numerosos manantiales al pie de las montañas e incluso afloramientos de agua en el piso de los valles de la cuenca, lo que en parte ha sido aprovechado para crear pozos artesianos por todos los valles, haciéndolo un área muy buena para la agricultura de regadío, aunque por la diferencia entre la descarga y la recarga de estas fuentes se producen hundimientos del suelo, los cuales son más notables en la ciudad de México.

## **5.2 Delimitación de la cuenca**

La cuenca se delimito con la extensión SWAT (Soil and Water Assessment Tool), de ArcView 3.2; esta herramienta permite al usuario poder delimitar cuencas en base a un procedimiento automático utilizando datos de Modelos de Elevación Digital (DEM). El programa genera corrientes y sus respectivos puntos de intersección para el proceso de delimitación de cuenca.

### 5.3 Selección de las estaciones meteorológicas

Para la selección de las estaciones meteorológicas de la zona de estudio se utilizó la base de datos MdCli 1.0.0.4 Manejador de datos Climáticos de México (Crespo, 2012), de dicha base se obtuvo que para la región se contaban con 92 estaciones para el Estado de México, 26 para el Distrito Federal, Hidalgo 63 y para Tlaxcala 11. De dichas estaciones se realizó una selección de acuerdo a los siguientes criterios:

- Contar con 20 años con datos a nivel diario de precipitación y temperatura principalmente.
- La estación debe de tener información climática  $\geq 80\%$  de datos registrados.
- Si se presentan datos faltantes de meses completos que no sea mayor del 30% anual, y esta condición será válida siempre y cuando los meses no sean continuos.
- Las estaciones seleccionadas deben tener una distribución más o menos homogénea de tal forma que pueda abarcarse toda la zona de estudio, para que el resultado sea representativo.

Finalmente el número de estaciones por estado se muestra en el Cuadro 1:

**Cuadro 1. Número de estaciones por estado**

Estado	Número de Estaciones
Estado de México	44
Distrito Federal	25
Hidalgo	17
<b>Total</b>	<b>86</b>

En el Cuadro 2 se muestra la información correspondiente a la ubicación de las estaciones y los años que se tomaron en cuenta para el estudio.

**Cuadro 2. Ubicación de las estaciones y años de estudio.**

	<b>Clave</b>	<b>Nombre de la Estación</b>	<b>Estado</b>	<b>Latitud (N)</b>	<b>Longitud (W)</b>	<b>Periodo de estudio</b>
1	15001	Acambay, Acambay	México	19.97	-98.85	1961-1980
2	15008	Atenco, Texcoco	México	19.55	-98.92	1961-1980
3	15011	Atarasquillo, Lerma	México	19.32	-99.47	1961-1980
4	15013	Calacoaya, Tlalnepantla	México	19.48	-99.21	1961-1980
5	15014	Chapulhuac, Oztolotepec	México	19.45	-99.48	1971-1990
6	15017	Coatepec de los Olivos	México	19.38	-98.85	1965-1984
7	15020	Chalco, Chalco	México	19.27	-98.90	1967-1986
8	15022	Chiconautla, Ecatepec	México	19.65	-99.00	1964-1983
9	15024	Presa Danxho, Jilotepec	México	19.88	-99.20	1961-1980
10	15027	El salitre (San Bartolo)	México	19.50	-99.30	1961-1980
11	15028	El Tajo, Tequisquiac	México	19.92	-99.13	1968-1987
12	15029	El Tejocote (Atlacomulco)	México	19.45	-98.90	1969-1988
13	15033	Huixquilucan	México	19.37	-99.35	1966-1985
14	15040	Km 2+120 (Bombas)	México	19.57	-99.02	1969-1988
15	15041	Km 27+250 Gran Canal	México	19.67	-99.07	1963-1982
16	15042	Km. 46+930 Gran Canal	México	19.80	-99.10	1961-1980
17	15044	La Grande (Texcoco)	México	19.55	-98.88	1961-1980
18	15047	Las Arboledas (R. Tuipan)	México	19.57	-99.22	1970-1989
19	15050	Los Reyes, La Paz	México	19.37	-98.98	1961-1980
20	15057	Mimiapan, Xonacatlan	México	19.42	-99.50	1961-1980
21	15058	Molinito (San Bartolo)	México	19.45	-99.25	1969-1988
22	15059	Molino Blanco, Naucalpan	México	19.48	-99.22	1961-1980
23	15071	Presa el Tigre, San B.M.	México	19.67	-99.45	1961-1980
24	15073	Psa. Guadalupe, Tultitlan	México	19.63	-99.25	1961-1968 1970-1981
25	15074	Presa la Concepción	México	19.70	-99.28	1961-1980
26	15077	Presa Totolica, Naucalpan	México	19.45	-99.28	1964-1983
27	15081	Presa Alemán A. Tepotzo	México	19.72	-99.23	1970-1989
28	15083	San Andres, Texcoco	México	19.52	-98.88	1961-1980
29	15090	San Jeronimo Xonacahuacan	México	19.75	-98.95	1965-1984
30	15092	San Juan Ixhuatepec	México	19.52	-99.13	1961-1977 1979-1981
31	15094	San Luis Ameca	México	19.18	-98.97	1961-1980
32	15095	San Luis Ayucan	México	19.52	-99.35	1962-1981
33	15101	S. M. Tlaixpan, Texcoco	México	19.52	-98.82	1961-1980
34	15103	San Pedro Nexapa, Amecameca	México	19.08	-98.73	1968-1987
35	15106	San Rafael, Tlalmanalco	México	19.20	-98.75	1961-1980
36	15114	Santiago Tlazala	México	19.58	-99.43	1966-1985
37	15115	Santo Tomas Teoloyucan	México	19.77	-99.35	1961-1980
38	15124	Tepexpan, Tepexpan	México	19.62	-98.92	1963-1982

	Clave	Nombre de la Estación	Estado	Latitud (N)	Longitud (W)	Periodo de estudio
39	15127	Totolica (S. Bartolo), N.	México	19.47	-99.25	1968-1987
40	15129	Tultepec, Tultepec	México	19.68	-99.10	1968-1987
41	15167	El Tejocote (Texcoco)	México	19.45	-98.90	1961-1980
42	15170	Chapingo, Texcoco	México	19.50	-98.88	1961-1980
43	15231	Psa. Iturbide, Oztolotepec	México	19.45	-99.48	1978-1990 1993-1999
44	15251	Atlacomulco (Prepa)	México	19.78	-98.87	1978-1988 1994-2002
45	9002	Ajusco, Tlalpan	D.F.	19.22	-99.20	1965-1984
46	9003	Aquiles Serdán 46 (Azca)	D.F.	19.45	-99.18	1961-1980
47	9007	Cincel 42 (Col. Sevilla)	D.F.	19.42	-99.12	1961-1977 1979-1981
48	9009	Col. Agrícola Oriental	D.F.	19.40	-99.08	1968-1987
49	9012	Col. Escandón	D.F.	19.50	-99.13	1961-1980
50	9013	Col. Moctezuma (SMN)	D.F.	19.43	-99.10	1967-1970 1972-1987
51	9014	Col. Santa Úrsula Coapa	D.F.	19.30	-99.12	1971-1990
52	9019	Desierto de los Leones	D.F.	19.30	-99.30	1961-1980
53	9020	Desv. Alta al Pedregal	D.F.	19.28	-99.25	1968-1987
54	9021	Egipto 7 (Azcapotzalco)	D.F.	19.47	-99.18	1961-1980
55	9022	Km. 39.5 a Cuernavaca	D.F.	19.13	-99.18	1966-1985
56	9025	Hda. La Patera G.A. Madero	D.F.	19.48	-99.15	1968-1987
57	9026	Morelos 77 (Ixtapalapa)	D.F.	19.37	-99.08	1961-1980
58	9029	Km. 6+250 Gran Canal	D.F.	19.48	-99.08	1961-1980
59	9030	La Venta Cuajimalpa (SMN)	D.F.	19.33	-99.30	1961-1980
60	9032	Milpa Alta, Milpa Alta	D.F.	19.18	-99.02	1964-1983
61	9034	Moyoguarda (Xochimilco)	D.F.	19.28	-99.10	1961-1980
62	9037	Presa Ansaldo, Contreras	D.F.	19.32	-99.22	1961-1980
63	9038	Presa Mixcoac, Mixcoac	D.F.	19.37	-99.27	1961-1980
64	9039	Presa Tacubaya, Tacubaya	D.F.	19.38	-99.22	1961-1980
65	9041	San Fco. Tlalne (Xochi)	D.F.	19.20	-99.12	1968-1987
66	9042	San Gregorio Atlap. Xoch	D.F.	19.25	-99.05	1962-1981
67	9043	Col. San Juan de Aragón	D.F.	19.47	-99.07	1961-1980
68	9047	Col. Tacuba, Tacuba	D.F.	19.45	-99.18	1961-1974 1976-1981
69	9049	Tarango (Villa Obregón)	D.F.	19.37	-99.28	1969-1988
70	13001	Acayuca, Zapotlán de J.	Hidalgo	20.07	-98.85	1968-1970 1972-1988
71	13002	Apan, Apan (DGE)	Hidalgo	19.72	-98.45	1961-1969 1971-1981
72	13006	Ciudad Sahagun	Hidalgo	19.77	-98.58	1961-1980
73	13008	El Manantial, Tizayuca	Hidalgo	19.85	-98.95	1964-1980 1983-1985
74	13017	Mineral del Chico	Hidalgo	20.22	-98.73	1961-1980
75	13027	San Jerónimo Tepeapulco	Hidalgo	19.82	-98.48	1976-1995
76	13029	San Lorenzo Zayula	Hidalgo	19.97	-98.35	1968-1987
77	13033	Singuilucan, Singuilucan	Hidalgo	19.97	-98.52	1969-1988
78	13035	Tezontepec, Tezontepec	Hidalgo	19.87	-98.82	1961-1980

	Clave	Nombre de la Estación	Estado	Latitud (N)	Longitud (W)	Periodo de estudio
79	13037	Tlanalapan, Tlanalapan	Hidalgo	19.82	-98.60	1969-1988
80	13039	Tolcayuca, Tolcayuca	Hidalgo	19.95	-98.92	1957-1961 1964-1978
81	13043	Zempoala, Zempoala	Hidalgo	19.90	-98.65	1969-1988
82	13047	Tezontepec, Tezontepec	Hidalgo	19.88	-98.83	1961-1970 1972-1981
83	13079	Presa el Girón, Epazoyuca	Hidalgo	20.05	-98.65	1973-1986 1988-1993
84	13085	Presa Tezoyo, Almoloya	Hidalgo	19.59	-98.27	1973-1992
85	13089	Tepeji, Tepeji del Rio	Hidalgo	19.90	-99.33	1973-1992
86	13116	El Sembo, Huasca Ocampo	Hidalgo	20.15	-98.57	1981-2000

En la Figura 1A se muestra la localización de las estaciones meteorológicas, los números de la columna uno del Cuadro son los mismos números que se representan en la figura.

#### 5.4 Cálculo de la ETo

Para calcular la evapotranspiración de referencia se utilizó el método de Thornthwaite.

Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración era proporcional a la temperatura media afectada de un coeficiente exponencial,  $a$  (Ecuación (15)).

$$ETo = 16 \left( \frac{li}{12} \right) \left( \frac{N}{30} \right) \left( \frac{10Ta}{I} \right)^a \text{----- Ecuación (15)}$$

Donde:

$ETo$  = Evapotranspiración mensual en  $mm/mes$

$Ta$  = Temperatura media mensual en  $^{\circ}C$ .

$I$  = Índice de calor anual

$N$  = Número de días en un mes

$I = \sum i_j ; j = 1, 2, \dots, 12$  Se calcula a partir del índice de calor mensual,  $i$ ,

como suma de los doce índices de calor mensuales:

$$i = \left( \frac{Ta}{5} \right)^{1.514} \text{----- Ecuación (16)}$$

$a$  = Parámetro que se calcula en función de  $I$  según la expresión:

$$a = 0.000000675 I^3 - 0.0000771 I^2 + 0.01792 I + 0.49239$$

Ecuación (17)

$li$  = Duración del día en horas; sin tomar en cuenta la intensidad de la radiación.

$$li = \frac{2w}{15}$$

Ecuación (18)

$w$  = Angulo Horario, se calcula de la siguiente manera:

$$w = \cos^{-1} [(-\tan \delta)(\tan \rho)]$$

Ecuación (19)

$\rho$  = Latitud del lugar

$\delta$  = Declinacion Solar en °C, se calcula de la siguiente manera:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[ 360 \left( \frac{284+n}{365} \right) \right]$$

Ecuación (20)

$n$  = Día Juliano del año

Para el cálculo de la Evapotranspiración se calculó con datos mensuales el Índice de calor Anual ( $I$ ) y el parámetro ( $a$ ), para cada año y así después aplicarlo a periodos de 10 días. En el Cuadro 3 se muestra un ejemplo del cálculo para el año 1961 de la estación 15001.

**Cuadro 3. Cálculo del Índice de calor anual y el parámetro  $a$ .**

Clave	Latitud	Longitud	Año	Periodo	Días/ Mes	T Media Mensual	$i$	$I$	$a$
15001	19.96	-99.85	1961	ENE	31	11.7	3.62		
15001	19.96	-99.85	1961	FEB	28	11.6	3.58		
15001	19.96	-99.85	1961	MAR	31	14.2	4.86		
15001	19.96	-99.85	1961	ABR	30	16.7	6.21		
15001	19.96	-99.85	1961	MAY	31	17	6.38		
15001	19.96	-99.85	1961	JUN	30	15.6	5.60		
15001	19.96	-99.85	1961	JUL	31	14.1	4.80		
15001	19.96	-99.85	1961	AGO	31	14.2	4.86		
15001	19.96	-99.85	1961	SEP	30	15.1	5.33		
15001	19.96	-99.85	1961	OCT	31	13.9	4.70		
15001	19.96	-99.85	1961	NOV	30	12.7	4.10		
15001	19.96	-99.85	1961	DIC	31	11.6	3.58	57.61	1.39

En el Cuadro 4 se muestra el Índice de calor Anual (I) y el parámetro (a) para todos los años de estudio de la estación 15001:

**Cuadro 4. Índice de calor anual y parámetro a para la estación 15001**

Año	I	a
1961	57.61	1.39
1962	59.25	1.42
1963	57.33	1.39
1964	57.77	1.40
1965	56.51	1.38
1966	55.34	1.36
1967	56.62	1.38
1968	60.10	1.43
1969	63.09	1.48
1970	60.24	1.44
1971	59.35	1.42
1972	61.08	1.45
1973	63.98	1.50
1974	61.01	1.45
1975	61.69	1.46
1976	58.27	1.40
1977	63.88	1.49
1978	64.11	1.50
1979	59.64	1.43
1980	57.14	1.39

Con los datos del Índice de calor Anual y el parámetro (a) se calculó la ETo para periodos de 10 días; en el Cuadro 5 se muestra un ejemplo para el año 1961 de la estación 15001.

Para el cálculo de la Declinación Solar se utilizó la Ecuación (20), se tomo para cada década el día Juliano que correspondía a la mitad de esta. Para el cálculo del Angulo Horario ( $w$ ) se utilizo la Ecuación (19), utilizando una latitud de  $19.96^\circ$  que es la latitud de la estación 15001.

**Cuadro 5. Cálculo de la ETo por el método del Thornthwaite.**

Año	Mes	Década	T Media (10 días)	I	a	Días/ Década	DJ	Declinación Solar ( $\varphi$ )	Angulo Horario ( $w$ )	li	ETo
1961	ENE	1	11.92	57.61	1.39	10	5	-22.65	81.28	10.84	39.83
1961		2	11.52	57.61	1.39	10	15	-21.27	81.87	10.92	38.25
1961		3	11.69	57.61	1.39	11	25	-19.26	82.71	11.03	43.39
1961	FEB	4	10.70	57.61	1.39	10	35	-16.69	83.75	11.17	35.30
1961		5	10.84	57.61	1.39	10	45	-13.62	84.95	11.33	36.46
1961		6	13.59	57.61	1.39	8	55	-10.15	86.27	11.50	40.59
1961	MAR	7	14.15	57.61	1.39	10	65	-6.38	87.67	11.69	54.57
1961		8	14.35	57.61	1.39	10	75	-2.42	89.12	11.88	56.56
1961		9	14.25	57.61	1.39	11	85	1.61	90.59	12.08	62.66
1961	ABR	10	15.34	57.61	1.39	10	95	5.60	92.04	12.27	64.11
1961		11	17.04	57.61	1.39	10	105	9.41	93.45	12.46	75.37
1961		12	17.68	57.61	1.39	10	115	12.95	94.79	12.64	80.48
1961	MAY	13	17.40	57.61	1.39	10	125	16.11	96.02	12.80	79.73
1961		14	17.67	57.61	1.39	10	135	18.79	97.10	12.95	82.38
1961		15	16.19	57.61	1.39	11	145	20.92	97.98	13.06	80.94
1961	JUN	16	16.77	57.61	1.39	10	155	22.42	98.62	13.15	77.78
1961		17	15.58	57.61	1.39	10	165	23.27	98.98	13.20	70.46
1961		18	14.54	57.61	1.39	10	175	23.42	99.05	13.21	64.03
1961	JUL	19	13.87	57.61	1.39	10	185	22.89	98.82	13.18	59.81
1961		20	14.28	57.61	1.39	10	195	21.67	98.30	13.11	61.96
1961		21	14.30	57.61	1.39	11	205	19.82	97.52	13.00	67.75
1961	AGO	22	14.12	57.61	1.39	10	215	17.38	96.53	12.87	59.90
1961		23	14.39	57.61	1.39	10	225	14.43	95.36	12.71	60.76
1961		24	14.28	57.61	1.39	11	235	11.05	94.07	12.54	65.24
1961	SEP	25	14.67	57.61	1.39	10	245	7.34	92.68	12.36	60.66
1961		26	15.60	57.61	1.39	10	255	3.42	91.24	12.17	65.06
1961		27	14.91	57.61	1.39	10	265	-0.61	89.78	11.97	60.11
1961	OCT	28	14.47	57.61	1.39	10	275	-4.61	88.32	11.78	56.71
1961		29	13.28	57.61	1.39	10	285	-8.48	86.90	11.59	49.50
1961		30	14.00	57.61	1.39	11	295	-12.10	85.53	11.40	57.69
1961	NOV	31	12.38	57.61	1.39	10	305	-15.36	84.27	11.24	43.53
1961		32	14.31	57.61	1.39	10	315	-18.17	83.15	11.09	52.57
1961		33	11.44	57.61	1.39	10	325	-20.44	82.22	10.96	38.04
1961	DIC	34	11.70	57.61	1.39	10	335	-22.11	81.52	10.87	38.92
1961		35	12.37	57.61	1.39	10	345	-23.12	81.08	10.81	41.84
1961		36	10.87	57.61	1.39	11	355	-23.45	80.94	10.79	38.37

## 5.5 Análisis Frecuencial de Lluvias

Se realizó el análisis frecuencial de lluvias para dos estaciones localizadas en diferentes áreas de la cuenca, la primera perteneciente al Estado de México con clave 15001 y la segunda al Distrito Federal con clave 9030; esto para conocer el periodo de cultivo en la cuenca de México. Se calculó el parámetro de Frecuencia R y 0.5R con las Ecuaciones (21 y 22):

$$R = \frac{\textit{Precipitación}}{\textit{ET}_o} \text{----- Ecuación (21)}$$

$$0.5R = \frac{\textit{Precipitación}}{0.5\textit{ET}_o} \text{----- Ecuación (22)}$$

Los datos de precipitación fueron en totales por década. Se contaron los datos calculados de R que fueran mayores que uno y se dividieron entre 20 que es el número de años de estudio, fue el mismo procedimiento para las 36 décadas que corresponden a un año. Lo mismo se hizo para 0.5R, solo que se buscaron los datos que fueran mayores que 0.5 y se dividieron entre 20 y el resultado fue la frecuencia para cada década.

Los resultados, es decir la frecuencia para cada década, son representados en un gráfico, cuya abscisa representa una escala de tiempo que abarca todo el año y graduada en décadas (36 décadas) y la ordenada una escala de frecuencia graduada de 0 a 1.

En el Cuadro 6, se presenta un ejemplo de cálculo de la frecuencia en la estación 15001 Acambay, Acambay para la década 1 y 2; en donde los números marcados en **negrita** al final del cuadro corresponden a la frecuencia de R y 0.5R respectivamente.

**Cuadro 6. Cálculo del Análisis Frecuencial de Lluvias.**

Año	Década 1					Década 2				
	P	ETo	R	0.5 ETo	0.5 R	P	ETo	R	0.5 ETo	0.5 R
1961	4.50	39.83	0.11	19.91	0.23	20.50	38.25	0.54	19.13	1.07
1962	0.00	34.75	0.00	17.38	0.00	0.00	36.69	0.00	18.34	0.00
1963	0.00	40.11	0.00	20.06	0.00	0.00	39.93	0.00	19.97	0.00
1964	64.50	25.60	2.52	12.80	5.04	8.00	34.21	0.23	17.10	0.47
1965	0.00	36.39	0.00	18.19	0.00	0.00	29.81	0.00	14.90	0.00
1966	5.00	32.51	0.15	16.26	0.31	0.00	35.20	0.00	17.60	0.00
1967	27.00	28.65	0.94	14.32	1.89	22.50	24.05	0.94	12.03	1.87
1968	0.00	35.50	0.00	17.75	0.00	2.50	34.40	0.07	17.20	0.15
1969	24.00	29.45	0.81	14.73	1.63	0.00	35.44	0.00	17.72	0.00
1970	0.00	37.72	0.00	18.86	0.00	1.00	29.06	0.03	14.53	0.07
1971	0.00	38.12	0.00	19.06	0.00	2.50	39.14	0.06	19.57	0.13
1972	0.00	40.10	0.00	20.05	0.00	0.00	31.92	0.00	15.96	0.00
1973	2.00	48.15	0.04	24.07	0.08	10.00	27.13	0.37	13.57	0.74
1974	0.00	40.13	0.00	20.06	0.00	0.00	34.86	0.00	17.43	0.00
1975	2.50	29.16	0.09	14.58	0.17	32.00	22.29	1.44	11.14	2.87
1976	0.00	27.66	0.00	13.83	0.00	0.00	30.21	0.00	15.11	0.00
1977	0.00	37.09	0.00	18.54	0.00	4.00	36.20	0.11	18.10	0.22
1978	0.00	32.23	0.00	16.11	0.00	0.00	32.91	0.00	16.45	0.00
1979	0.00	34.16	0.00	17.08	0.00	0.00	40.64	0.00	20.32	0.00
1980	0.00	32.50	0.00	16.25	0.00	0.00	36.56	0.00	18.28	0.00
			<b>0.05</b>		<b>0.15</b>			<b>0.05</b>		<b>0.2</b>

### 5.6 Cálculo del coeficiente de cultivo (Kc)

El coeficiente de cultivo se estimó siguiendo la metodología de la FAO (1976) plasmado en el boletín 24, este método divide en cuatro fases al cultivo en estudio, las cuales son:

- Fase Inicial.
- Fase de Desarrollo del cultivo.
- Fase de Medios de Periodo.
- Fase de Finales de Periodo.

Es necesario conocer la duración total del ciclo de cultivo y la duración de cada una de sus fases, para poder obtener esta información se consultó el Boletín 24 de la FAO y el Diagrama de las principales especies vegetales con las cuales se efectúan investigaciones agrícolas en México (INIA, 1985); considerando como referencia que dicha zona climática se pareciera a la de estudio. La duración del ciclo vegetativo de los cultivos a estudiar se muestra en el Cuadro 7.

**Cuadro 7. Duración de las etapas del ciclo vegetativo de los cultivos estudiados.**

		<b>FRIJOL</b>	<b>PAPA</b>	<b>TRIGO</b>	<b>HABA</b>	<b>MAÍZ</b>
<b>ETAPAS</b>	<b>Inicial</b>	20	25	20	20	30
	<b>Desarrollo</b>	30	30	30	30	40
	<b>Mediados</b>	40	45	60	30	40
	<b>Cosecha</b>	20	30	20	20	30
Duración del ciclo completo (Días)		<b>110</b>	<b>130</b>	<b>130</b>	<b>100</b>	<b>140</b>

Para obtener el Kc en la fase inicial se estimó la frecuencia de lluvias para cada década, posteriormente se tomó la ETo de cada una de las décadas a nivel diario y con estos datos se entró en la gráfica de la Figura 6 y se obtuvo el Kc de la fase inicial.

Para la fase de mediados y finales del periodo se tomó del lugar donde se situaban las estaciones meteorológicas, la humedad relativa y la velocidad del viento, con estos datos se entró al Cuadro 22, que se encuentra en el boletín 24 de la FAO, y dependiendo del cultivo se encontró su Kc correspondiente de dichas fases.

Para representar gráficamente las fases se procedió a tomar a la fase inicial y de mediados del periodo como constantes y se traza una línea recta de dichas fases, para la fase de desarrollo del cultivo se trazó una línea recta entre el valor de Kc al final de la fase inicial y al principio de mediados del periodo y para la fase de finales de periodo se formó una línea recta entre el valor de Kc al final de la fase de mediados del periodo y al final del periodo vegetativo.

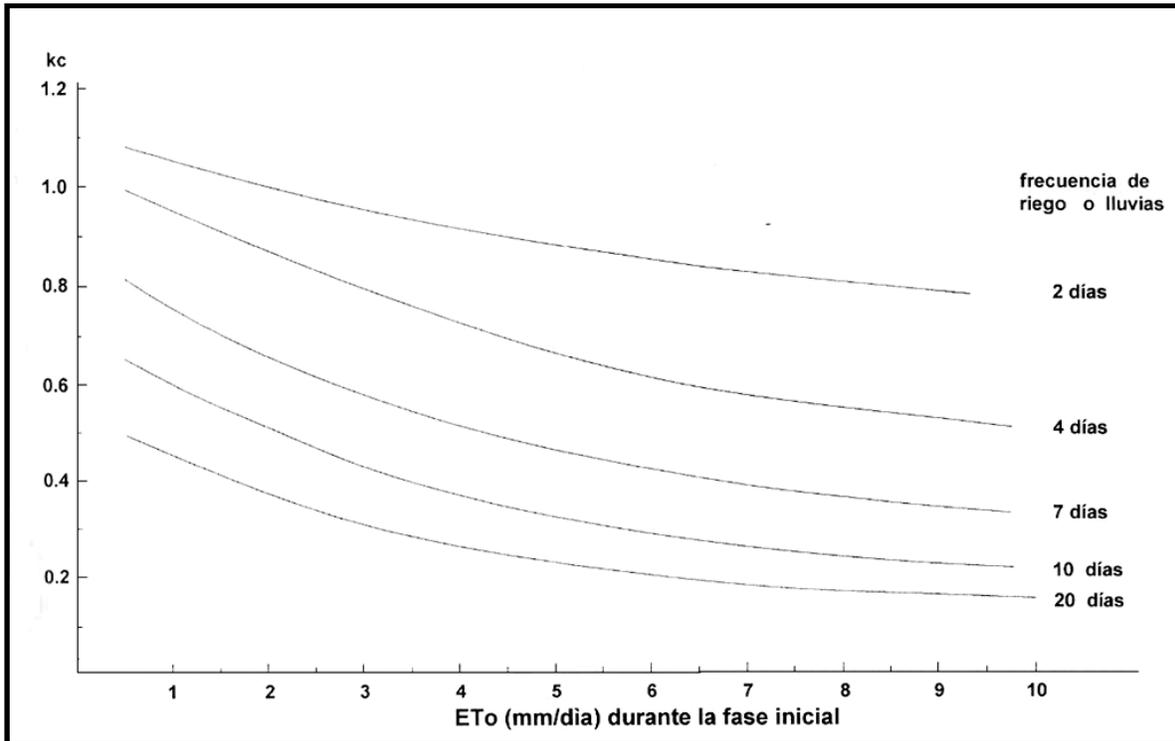


Figura 6. Kc medio en la fase inicial, en función del nivel medio de la ETo (durante la fase inicial) y la frecuencia de riego o de unas lluvias apreciables (FAO, 1976)

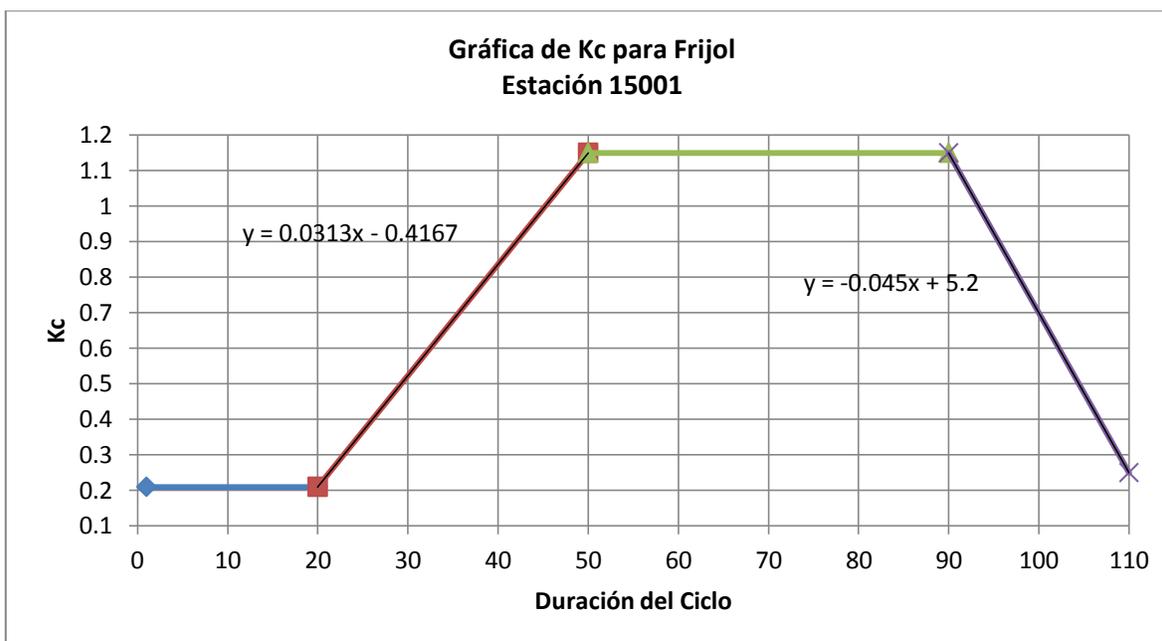
Con la gráfica obtenida se determinó el valor de Kc para cada década del periodo de cada cultivo.

A continuación se muestra un ejemplo del cálculo del Kc para la estación 15001 Acambay, Acambay en el Estado de México, para los cultivos de frijol, papa, trigo, haba, maíz.

Para el cálculo de Kc de la Etapa de Desarrollo y Recolección se tomó el valor medio de cada década para obtener el Kc representativo de esta usando la ecuación de la Recta que se muestra en las Figuras de la 7 a la 11.

**Cuadro 8. Valores del Kc para Frijol.**

FRIJOL							
Inicial		Desarrollo		Mediados		Recolección	
Días	Kc	Días	Kc	Días	Kc	Días	Kc
1 a 20	0.21	25	0.3658	51 a 90	1.15	95	0.925
		35	0.6788			105	0.475
		45	0.9918				



**Figura 7. Gráfica de Kc para Frijol.**

**Cuadro 9. Valores del Kc para Papa.**

PAPA							
Inicial		Desarrollo		Mediados		Recolección	
Días	Kc	Días	Kc	Días	Kc	Días	Kc
1 a 30	0.21	35	0.3655	61 a 100	1.15	105	1.0868
		45	0.6785			115	0.9538
		55	0.9915			125	0.8208

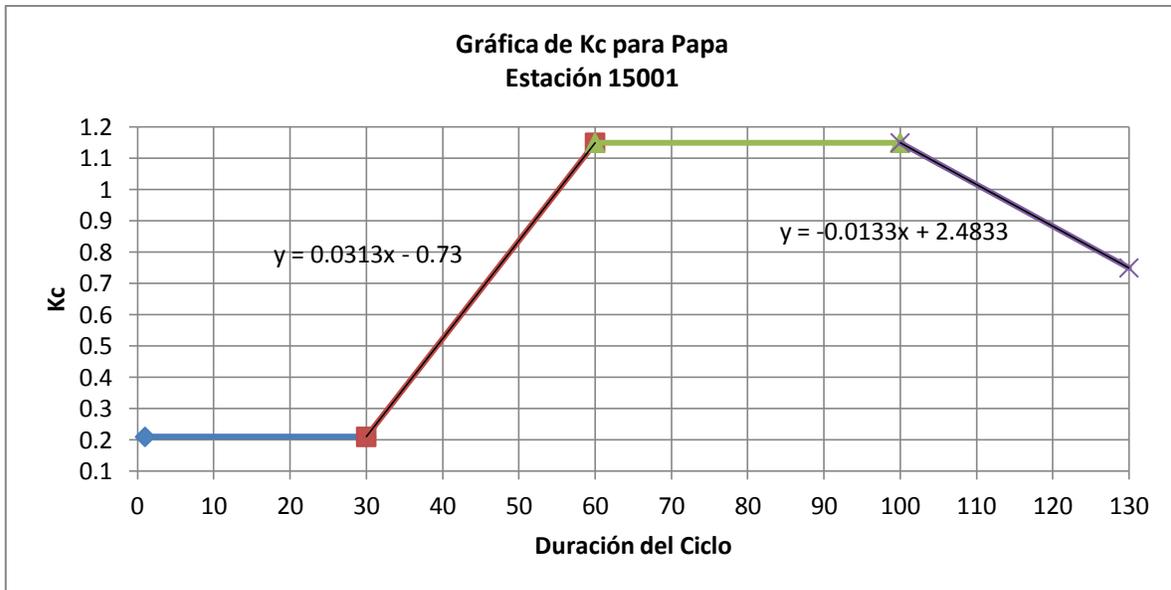


Figura 8. Gráfica de Kc para Papa.

Cuadro 10. Valores del Kc para Trigo.

TRIGO							
Inicial		Desarrollo		Mediados		Recolección	
Días	Kc	Días	Kc	Días	Kc	Días	Kc
1 a 20	0.21	25	0.3658	51 a 110	1.15	115	1
		35	0.6788			125	0.7
		45	0.9918				

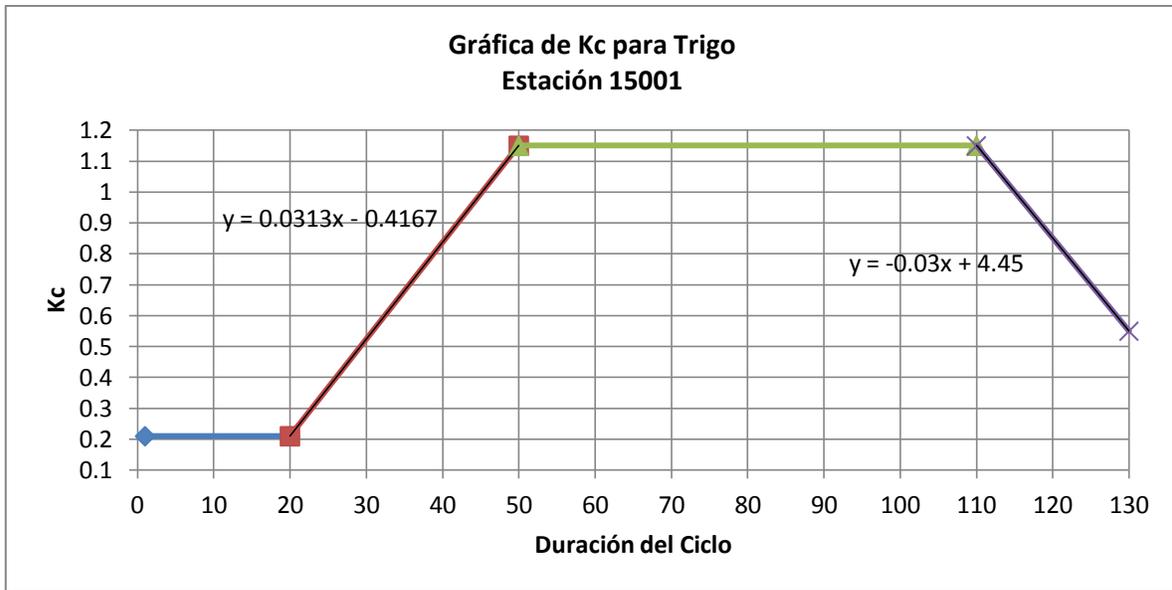
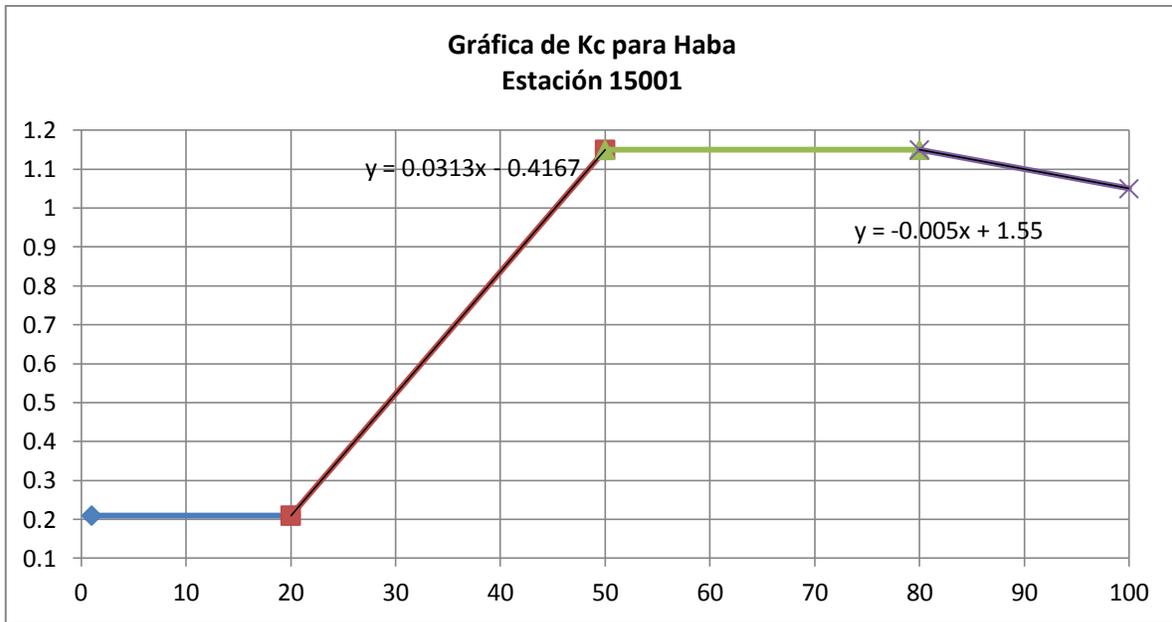


Figura 9. Gráfica de Kc para Trigo.

Cuadro 11. Valores del Kc para Haba.

HABA							
Inicial		Desarrollo		Mediados		Recolección	
Días	Kc	Días	Kc	Días	Kc	Días	Kc
1 a 20	0.21	25	0.3658	51 a 80	1.15	85	1.125
		35	0.6788			95	1.075
		45	0.9918				



**Figura 10. Gráfica de Kc para Haba**

**Cuadro 12. Valores del Kc para Maíz**

<b>MAÍZ</b>							
<b>Inicial</b>		<b>Desarrollo</b>		<b>Mediados</b>		<b>Recolección</b>	
<b>Días</b>	<b>Kc</b>	<b>Días</b>	<b>Kc</b>	<b>Días</b>	<b>Kc</b>	<b>Días</b>	<b>Kc</b>
1 a 30	0.21	35	0.3275	71 a 110	1.15	115	1.0622
		45	0.5625			125	0.8792
		55	0.7975			135	0.6962
		65	1.0325				

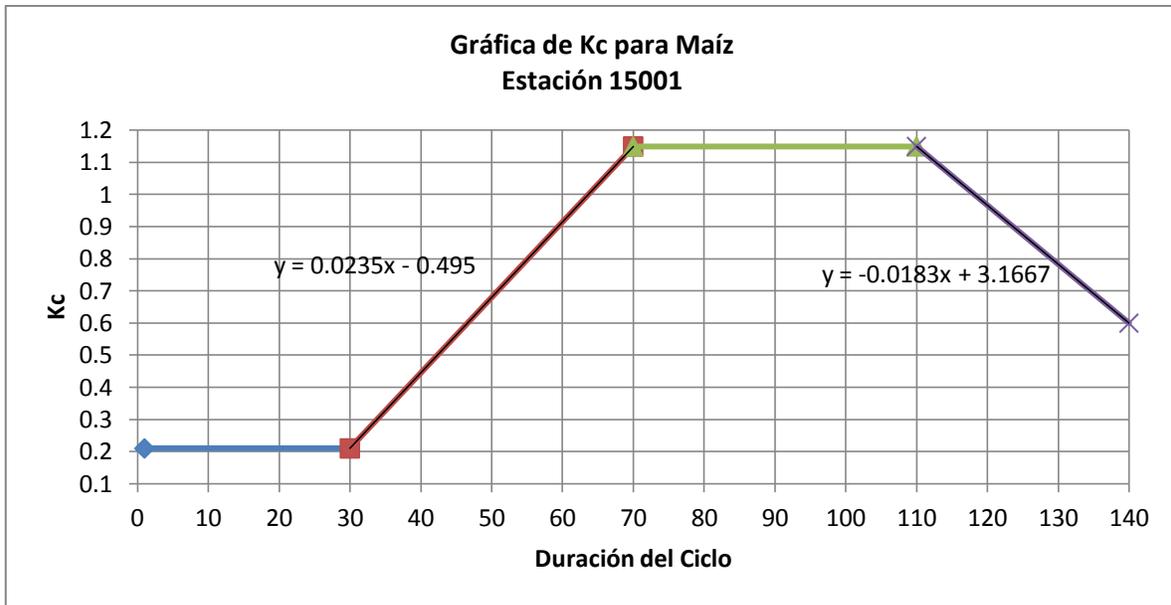


Figura 11. Gráfica de Kc para Maíz.

### 5.7 Cálculo de la Evapotranspiración del cultivo (ETM)

Con los datos de ETo y Kc correspondientes se procede a calcular la ETM, utilizando la Ecuación (23), se estimó la ETM, utilizando el método de la raíz cubica.

$$ETM = Kc * ETo \text{----- Ecuación (23)}$$

Donde:

ETM = Evapotranspiración Máxima, en mm.

ETo = Evapotranspiración de Referencia, en mm.

Kc = Coeficiente del cultivo, es adimensional.

## 5.8 Cálculo del balance hídrico (método simplificado).

### 5.8.1 Cálculo de la capacidad de almacenamiento del suelo (CA).

La CA se determinó a partir de la textura del suelo (Ecuación (24)), los parámetros utilizados fueron los porcentajes de arcillas, limos y arenas, además de la profundidad del suelo, los datos de suelo de la zona de estudio fueron proporcionados por el INEGI en el disco Perfiles de suelo versión 1.2.

Con los datos de textura se entra en la Figura 3 propuesta por Norero (1976), para determinar la fracción volumétrica de agua aprovechable ( $f_{vaa}$ ). Se multiplica la  $f_{vaa}$  por la profundidad del suelo ( $Pr$ ) para obtener la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (CA), ésta es expresada en mm.

$$CAA = f_{vaa} * Pr \text{----- Ecuación (24)}$$

Donde:

$CAA$  = Capacidad de almacenamiento de agua de un suelo, en mm.

$f_{vaa}$  = Fracción volumétrica de agua aprovechable, en cm/cm.

$Pr$  = Profundidad del suelo, en cm.

### 5.8.2 Determinación de la precipitación para el balance hídrico

La precipitación utilizada para el balance es la que se obtuvo de la sumatoria a nivel decenal para cada estación, a estas décadas se aplicó el método de la raíz cúbica para poder obtener así la lluvia a dos niveles de probabilidad de excedencia (20 y 70 %).

Con los datos de precipitación, CAA y ETM se realizó el balance hídrico con la Ecuación (3) del balance hídrico simplificado, en la ecuación se introdujo el valor de la precipitación a un cierto nivel de probabilidad y por lo tanto la probabilidad de ETM debe ser el complemento de éste.

Es importante mencionar que para realizar el balance se considera para la primera década el valor de 0 en la  $HA_{i-1}$ .

En el balance se obtiene deficiencias, almacenamientos y excesos.

Se debe mencionar ciertos detalles que se deben tener en cuenta para el cálculo del balance hídrico entre ellos se encuentran:

- Cuando la fórmula arroja un valor negativo en un cierto intervalo de tiempo entonces la HA del siguiente intervalo será de 0.
- Cuando el suelo saturó su CA entonces los excesos serán la diferencia entre la precipitación y la ETM.

## **5.9 Índice de satisfacción de necesidades hídricas**

Para el cálculo del índice de satisfacción de necesidades hídricas se utilizó la Ecuación (14). Como ya se había comentado en la revisión de literatura se toma el valor de 100 por que la disponibilidad de agua en el suelo antes de la fecha de siembra debe satisfacer las necesidades de agua de la planta durante la primera década. La ETM en la fórmula es la sumatoria de todas las ETM de cada década durante toda la estación de crecimiento y el déficit que se requiere es por cada década. La fórmula se aplicara década por década hasta el final de la estación de crecimiento, donde el índice se expresara en porcentaje.

## **5.10 Cartografía**

La cartografía se realizó con la ayuda del programa ArcView 3.2 con la extensión Spatial Analysis Surface, dicha extensión interpola con el método del inverso de la distancia (IDW) para delimitar las zonas de las variables que se pretende representar.

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Análisis Frecuencial de Lluvias

Análisis Frecuencial de Lluvias permitió establecer la estación de crecimiento. Se determinó que la estación de crecimiento comienza en la primera década donde la frecuencia relativa sobrepasa el valor de 0.8 y termina con la primera década con una frecuencia inferior a 0.8, lo que significa una frecuencia de ocurrencia del fenómeno de 4 de cada 5 años y corresponde a un riesgo aceptable para la agricultura.

El Análisis Frecuencial de Lluvias se aplicó solamente a las estaciones 15001 y 15115 que se encuentran al Sur y al Norte respectivamente del área de estudio; esto para determinar la estación de crecimiento.

La estación 15001 de acuerdo a la gráfica es una estación más seca por lo que la estación de crecimiento comienza en la década 17 que es donde la frecuencia es 0.8.

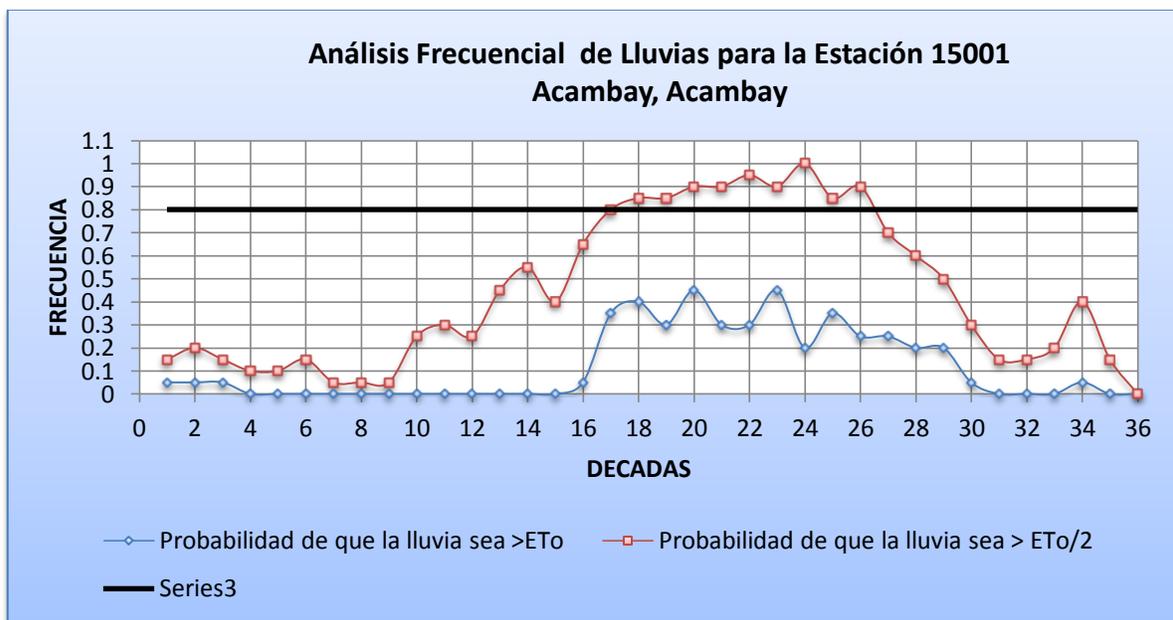


Figura 12. Análisis Frecuencial de Lluvias, estación 15001.

De acuerdo a la gráfica la estación 15106 presentó mayor amplitud en la estación de crecimiento debido a que la Frecuencia de Lluvias es más alta en esta estación, aquí se ve claramente como la estación de crecimiento si puede establecerse en la década 16 ya que sobrepasa la Frecuencia de 0.8.

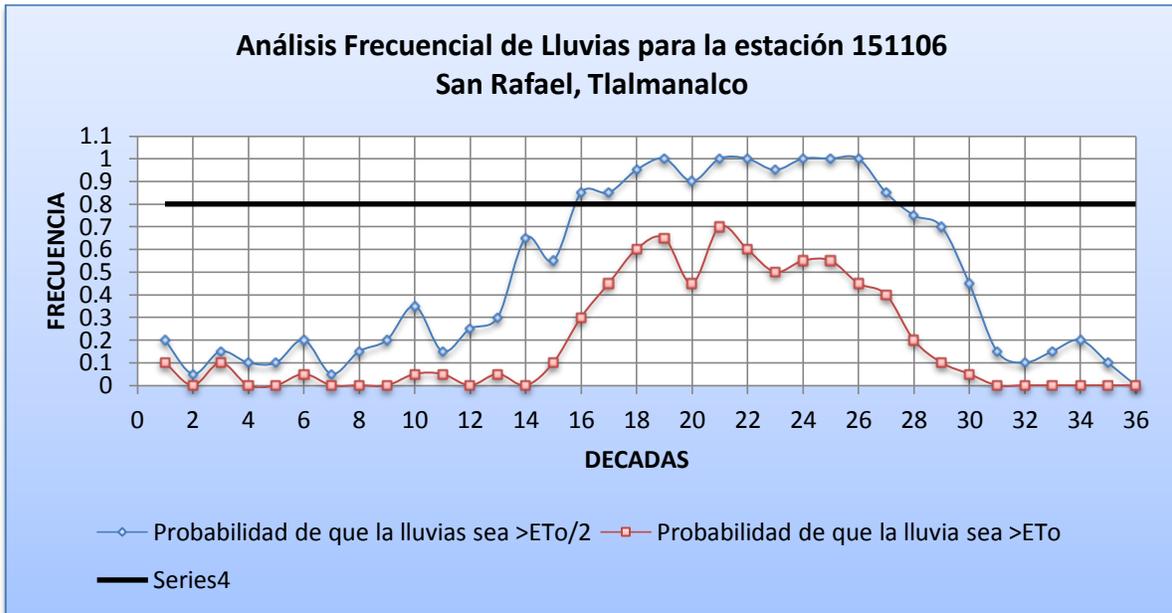


Figura 13. Análisis Frecuencial de Lluvias, estación 15106.

## 6.2 Inicio de la estación de crecimiento

De acuerdo con el Análisis Frecuencial de Lluvias se determinó que la estación de crecimiento se establecía entre la década 16 y 17 siendo la primera la que más representaba a toda la región de la cuenca de México, por lo que para fines prácticos se tomó la década 16 como la estación de crecimiento que corresponde del primero al diez de Junio.

### 6.3 Probabilidad de lluvia

Las probabilidades de lluvia fueron calculadas por el método de la raíz cubica.

En el Cuadro 13 se observa la precipitación total durante la estación de crecimiento en los cultivos de Frijol, Haba, Maíz, Papa y Trigo para una probabilidad de 70 y 20%

**Cuadro 13. Lluvia acumulada para la probabilidad 70 y 20% para los cultivos de estudio**

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAIZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
15001	19.967	-98.850	Acambay, Acambay	235.79	751.04	225.85	690.43	244.41	874.15	243.86	846.24	243.86	846.24
15008	19.550	-98.917	Atenco, Texcoco	182.03	473.42	167.98	436.97	190.23	553.20	188.98	531.05	188.98	531.05
15011	19.317	-99.467	Atarasquillo, Lerma	383.64	780.64	353.37	721.45	393.88	886.66	392.66	867.06	392.66	867.06
15013	19.477	-99.214	Calacoaya, Tlalnepantla	226.65	662.05	202.64	603.85	235.98	759.04	235.45	741.70	235.45	741.70
15014	19.450	-99.483	Chapulhuac, Oztolotepec	263.63	685.90	251.36	628.45	270.16	790.91	266.74	765.11	266.74	765.11
15017	19.383	-98.850	Coatepec de los Olivos	204.55	502.02	192.28	464.70	211.96	583.58	209.41	561.83	209.41	561.83
15020	19.267	-98.900	Chalco, Chalco	219.34	520.81	203.43	482.60	226.10	599.14	223.50	578.61	223.50	578.61
15022	19.650	-99.000	Chiconautla, Ecatepec	144.80	473.80	138.60	438.86	153.58	558.06	150.96	535.44	150.96	535.44
15024	19.883	-99.200	Presa Danxho, Jilotepec	268.26	764.63	252.88	702.37	282.59	898.99	280.17	871.49	280.17	871.49
15027	19.500	-99.300	El salitre (San Bartolo)	302.54	729.61	278.82	672.12	316.74	833.63	315.44	814.47	315.44	814.47
15028	19.917	-99.133	El Tajo, Tequisquiac	176.94	557.56	159.85	507.75	182.25	653.01	181.85	632.58	181.85	632.58
15029	19.450	-98.900	El Tejocote (Atlacomulco)	203.33	679.25	196.01	628.51	207.06	767.71	206.80	752.16	206.80	752.16
15033	19.367	-99.350	Huixquilucan	491.87	1010.00	457.78	930.86	513.35	1147.06	505.69	1114.99	505.69	1114.99
15040	19.567	-99.017	Km 2+120 (Bombas)	152.26	459.41	147.81	433.01	156.02	524.31	155.69	509.39	155.69	509.39
15041	19.667	-99.067	Km 27+250 Gran Canal	161.91	503.52	153.53	465.21	169.30	594.44	167.86	576.46	167.86	576.46
15042	19.800	-99.100	Km. 46+930 Gran Canal	145.13	488.97	136.25	450.35	151.29	583.35	150.81	564.37	150.81	564.37
15044	19.550	-98.883	La Grande (Texcoco)	174.10	498.71	160.59	458.07	183.05	585.00	181.78	566.11	181.78	566.11

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAIZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
15047	19.567	-99.217	Las Arboledas (R. Tuipan)	207.58	646.04	197.59	596.66	212.81	728.65	212.53	718.27	212.53	718.27
15050	19.367	-98.983	Los Reyes, La Paz	181.53	477.27	170.77	438.96	189.92	557.12	189.11	542.28	189.11	542.28
15057	19.417	-99.500	Mimiapan, Xonacatlan	391.50	1117.84	353.76	1041.63	416.85	1258.39	410.08	1229.50	410.08	1229.50
15058	19.450	-99.250	Molinito (San Bartolo)	318.80	797.72	299.05	744.28	325.77	893.83	325.05	877.14	325.05	877.14
15059	19.483	-99.217	Molino Blanco, Naucalpan	269.93	719.29	249.69	665.74	281.36	817.29	280.28	801.98	280.28	801.98
15071	19.667	-99.450	Presa el Tigre, San B.M.	249.95	707.19	235.47	656.22	258.94	818.22	257.59	795.95	257.59	795.95
15073	19.633	-99.250	Psa. Guadalupe, Tultitlan	201.37	584.24	183.50	539.09	210.28	692.27	209.19	673.10	209.19	673.10
15074	19.700	-99.283	Presa la Concepción	198.41	570.60	186.01	520.21	207.91	678.83	206.76	653.49	206.76	653.49
15077	19.450	-99.283	Presa Totolica, Naucalpan	332.78	823.04	307.45	761.45	346.29	939.79	342.96	910.03	342.96	910.03
15081	19.717	-99.233	Presa Alemán A. Tepotzo	179.20	555.10	169.36	515.20	183.57	632.10	182.96	615.33	182.96	615.33
15083	19.517	-98.883	San Andrés, Texcoco	161.76	438.68	148.37	403.89	170.01	516.61	169.11	497.21	169.11	497.21
15090	19.750	-98.950	San Jerónimo Xonacahuacan	147.62	473.03	137.73	432.27	151.54	548.95	150.59	528.66	150.59	528.66
15092	19.517	-99.133	San Juan Ixhuatepec	175.25	523.95	167.76	482.38	181.76	598.15	181.16	588.60	181.16	588.60
15094	19.183	-98.967	San Luis Ameca	248.28	564.40	232.33	521.24	263.26	666.11	261.04	647.02	261.04	647.02
15095	19.517	-99.350	San Luis Ayucan	421.16	985.86	387.22	904.46	452.98	1160.86	448.23	1123.18	448.23	1123.18
15101	19.517	-98.817	S. M. Tlaixpan, Texcoco	170.28	485.96	160.23	450.37	180.44	575.77	177.56	556.76	177.56	556.76
15103	19.083	-98.733	San Pedro Nexapa, Amecameca	291.45	698.22	269.88	643.80	308.70	817.34	306.72	794.64	306.72	794.64
15106	19.200	-98.750	San Rafael, Tlalmanalco	412.04	890.53	379.41	823.23	444.70	1054.53	438.59	1014.67	438.59	1014.67
15114	19.583	-99.433	Santiago Tlazala	470.11	1106.94	433.93	1014.70	503.06	1294.94	495.32	1252.19	495.32	1252.19
15115	19.767	-99.350	Santo Tomas Teoloyucan	153.90	483.45	143.63	439.71	161.24	578.93	159.76	555.01	159.76	555.01
15124	19.617	-98.917	Tepexpan, Tepexpan	170.10	492.73	163.14	460.35	179.19	585.45	177.97	564.85	177.97	564.85
15127	19.467	-99.250	Totolica (S. Bartolo), N.	282.09	769.90	265.30	710.30	290.55	864.77	290.03	846.31	290.03	846.31
15129	19.683	-99.100	Tultepec, Tultepec	129.13	513.41	123.68	477.35	131.90	590.33	131.88	579.69	131.88	579.69
15167	19.450	-98.900	El Tejocote (Texcoco)	175.33	461.72	167.44	429.71	183.32	543.25	182.56	525.64	182.56	525.64
15170	19.500	-98.883	Chapingo, Texcoco	207.28	498.29	191.59	460.60	217.45	582.12	216.18	563.03	216.18	563.03
15231	19.450	-99.483	Psa. Iturbide, Oztolotepec	635.68	1255.66	591.54	1157.57	665.46	1437.42	661.55	1399.74	661.55	1399.74
15251	19.783	-98.867	Atlacomulco (Prepa)	197.94	610.58	194.22	560.50	202.24	690.98	200.52	669.15	200.52	669.15
9002	19.217	-99.200	Ajusco, Tlalpan	444.17	1039.71	415.06	956.72	475.15	1193.12	470.81	1157.78	470.81	1157.78

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAIZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
9003	19.450	-99.183	Aquiles Serdan 46 (Azca)	248.87	681.40	226.78	627.17	259.25	789.40	257.94	770.25	257.94	770.25
9007	19.417	-99.117	Cincel 42 (Col. Sevilla)	167.42	545.75	156.19	499.21	174.53	623.07	173.05	610.22	173.05	610.22
9009	19.400	-99.083	Col. Agrícola Oriental	151.34	466.05	143.57	428.76	155.89	533.86	155.39	521.47	155.39	521.47
9012	19.500	-99.133	Col. Escandón	275.81	675.31	248.83	617.31	286.49	778.83	285.32	758.02	285.32	758.02
9013	19.433	-99.100	Col. Moctezuma (SMN)	188.69	564.37	179.25	522.23	194.72	643.40	194.37	631.51	194.37	631.51
9014	19.300	-99.117	Col. Santa Ursula Coapa	281.21	677.77	263.89	627.31	291.78	785.53	290.29	759.91	290.29	759.91
9019	19.300	-99.300	Desierto de los Leones	520.67	1083.43	467.77	991.13	561.07	1269.42	551.42	1231.36	551.42	1231.36
9020	19.283	-99.250	Desv. Alta al Pedregal	376.10	881.38	346.62	815.47	391.73	1017.09	389.51	990.40	389.51	990.40
9021	19.467	-99.183	Egipto 7 (Azcapotzalco)	254.11	685.78	233.28	627.98	264.38	794.88	263.51	779.73	263.51	779.73
9022	19.133	-99.183	Km. 39.5 a Cuernavaca	496.60	1032.85	460.50	959.14	523.72	1180.64	518.65	1150.27	518.65	1150.27
9025	19.483	-99.150	Hda. La Patera G.A. Madero	171.71	544.93	158.40	507.94	176.51	618.58	176.34	605.31	176.34	605.31
9026	19.367	-99.083	Morelos 77 (Ixtapalapa)	183.92	505.95	170.06	455.26	194.42	591.59	192.29	574.58	192.29	574.58
9029	19.483	-99.083	Km. 6+250 Gran Canal	170.63	490.66	159.03	452.00	178.64	577.89	177.53	564.85	177.53	564.85
9030	19.333	-99.300	La Venta Cuajimalpa (SMN)	493.71	1113.90	448.51	1020.64	525.91	1310.40	518.11	1274.06	518.11	1274.06
9032	19.183	-99.017	Milpa Alta, Milpa Alta	231.76	552.92	218.82	517.86	241.50	633.20	238.31	616.34	238.31	616.34
9034	19.283	-99.100	Moyoguarda (Xochimilco)	238.13	575.97	216.95	514.50	247.77	665.35	245.64	646.67	245.64	646.67
9037	19.317	-99.217	Presa Ansaldo, Contreras	351.06	812.36	323.34	746.00	369.56	940.46	365.35	917.61	365.35	917.61
9038	19.367	-99.267	Presa Mixcoac, Mixcoac	361.98	812.32	331.85	743.18	382.72	944.77	380.25	927.96	380.25	927.96
9039	19.383	-99.217	Presa Tacubaya, Tacubaya	302.71	715.16	272.09	654.47	323.60	829.79	321.71	814.22	321.71	814.22
9041	19.200	-99.117	San Fco. Tlalne (Xochi)	331.73	798.60	310.61	739.13	346.08	911.14	345.57	892.00	345.57	892.00
9042	19.250	-99.050	San Gregorio Atlap. Xoch	243.91	651.29	228.65	598.62	257.54	746.63	256.04	730.76	256.04	730.76
9043	19.467	-99.067	Col. San Juan de Aragón	178.58	478.72	166.98	441.20	188.09	565.41	186.44	550.24	186.44	550.24
9047	19.450	-99.183	Col. Tacuba, Tacuba	208.29	671.03	190.87	617.36	220.68	767.95	220.50	757.19	220.50	757.19
9049	19.367	-99.283	Tarango (Villa Obregón)	274.62	798.65	254.48	724.85	282.72	906.96	282.16	891.91	282.16	891.91
13001	20.067	-98.850	Acayuca, Zapotlan de J.	52.79	370.93	51.82	351.48	53.02	411.64	53.02	404.72	53.02	404.72
13002	19.717	-98.450	Apan, Apan (DGE)	135.15	470.99	128.60	441.22	141.38	537.41	140.63	522.99	140.63	522.99
13006	19.767	-98.583	Ciudad Sahagun	111.72	402.65	105.89	381.62	115.95	453.25	115.63	442.50	115.63	442.50
13008	19.850	-98.950	El Manantial, Tizayuca	108.66	406.96	98.93	374.38	111.33	468.73	110.73	457.40	110.73	457.40

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAIZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
13017	20.217	-98.733	Mineral del Chico	398.07	1167.78	357.75	1050.22	442.93	1434.54	431.18	1367.51	431.18	1367.51
13027	19.817	-98.483	San Jerónimo Tepeapulco	144.07	558.78	132.42	517.55	146.03	600.35	145.81	591.09	145.81	591.09
13029	19.967	-98.350	San Lorenzo Zayula	78.67	469.86	69.83	429.23	91.41	565.84	88.72	542.89	88.72	542.89
13033	19.967	-98.517	Singuilucan, Singuilucan	94.40	416.40	87.15	380.65	102.80	493.12	101.91	478.60	101.91	478.60
13035	19.867	-98.817	Tezontepec, Tezontepec	81.53	365.32	79.16	339.40	83.94	418.52	83.60	406.97	83.60	406.97
13037	19.817	-98.600	Tlanalapan, Tlanalapan	92.66	417.95	87.82	393.00	93.95	461.02	93.94	455.25	93.94	455.25
13039	19.950	-98.917	Tolcayuca, Tolcayuca	81.74	921.82	78.30	869.76	84.01	1058.25	83.68	1015.38	83.68	1015.38
13043	19.900	-98.650	Zempoala, Zempoala	82.28	389.71	79.96	365.59	83.36	433.21	83.31	425.49	83.31	425.49
13047	19.883	-98.833	Tezontepec, Tezontepec	94.04	384.31	90.10	357.34	96.35	434.08	96.19	425.67	96.19	425.67
13079	20.050	-98.650	Presa el Girón, Epazoyuca	48.66	283.63	45.16	257.91	51.41	318.95	51.38	312.91	51.38	312.91
13085	19.585	-98.267	Presa Tezoyo, Almoloya	92.13	471.46	85.65	432.91	99.22	551.22	98.22	537.03	98.22	537.03
13089	19.900	-99.333	Tepeji, Tepeji del Rio	139.27	564.08	131.28	516.88	140.79	637.45	140.50	619.76	140.50	619.76
13116	20.150	-98.567	El Sembo, Huasca Ocampo	147.84	641.45	130.88	575.59	179.75	803.04	176.62	771.11	176.62	771.11

En la Figura 3A del Anexo, se muestra la distribución espacial de la lluvia probabilística al 70% para el cultivo de Frijol, se observa que la zona del suroeste es donde más llueve en un rango que va de los 440 a 518 mm; para esta probabilidad donde menos llueve es la zona centro y noreste con una precipitación que va de los 48 a 205 mm y representan la mayor parte de la región.

La Figura 4A del Anexo, muestra la distribución espacial de la lluvia probabilística al 20% para Frijol, se observa claramente que en la región suroeste hay más precipitación de 800 a 1000 mm; la zona que presenta una precipitación que va de los 400 a 600 mm es la de mayor área.

La lluvia probabilística al 70% para el cultivo de Haba muestra que la zona de mayor precipitación para su estación de crecimiento es la suroeste con un rango de 300 a 500 mm, la zona de menor precipitación es la centro y noreste y son las de mayor área de la cuenca de México con un rango que va de los 45 a 200 mm, como lo muestra la Figura 5A del Anexo. La Figura 6A muestra la distribución espacial de la lluvia al 20% para el cultivo de Haba, siendo la zona que más llueve la suroeste con precipitaciones de 800 a 1000 mm, la precipitación de 380 a 500 es la que predomina en la región para esa probabilidad y ese cultivo.

La lluvia acumulada en la estación de crecimiento del Maíz, para una probabilidad de 70% se muestra en la Figura 7A, donde en la mayor parte de la región hay poca lluvia (50 a 200 mm) y solo en la parte del suroeste hay lluvias que van de los 300 a los 550 mm. Para la probabilidad de 20% observando la Figura 8A vemos que la zona norte es donde menos llueve y representa la mayor parte de la región va de 400 a 650 mm y la zona suroeste sigue siendo en donde más se presentan precipitaciones.

En la Figura 9A para el cultivo de Papa a una lluvia probabilística del 70%, se observa que llueve más en la región suroeste de 380 a 550 mm, la zona norte es donde menos llueve su rango va de 50 a 140 mm y representa una parte importante de la cuenca. Para la lluvia

probabilística del 20% del cultivo de Papa el rango que más predomina es el de 470 a 630 mm como se observa en la Figura 10A.

En la Figura 11A del Anexo se muestra la distribución probabilística al 70% del cultivo de Trigo; se observa que las estaciones de la zona suroeste son las más lluviosas y las del norte son las más secas, la mayor superficie de la región presenta una precipitación entre 50 y 200 mm.

En la Figura 12A de Anexo se muestra la distribución espacial de la lluvia probabilística al 20% del cultivo de Trigo, en esta figura la zona suroeste sigue siendo la de mayor precipitación, la mayor parte de la región está en el rango de 470 a 630 mm.

#### **6.4 Cálculo de la Capacidad de Almacenamiento de agua (CAA)**

El cálculo de la Capacidad de Almacenamiento de Agua es un parámetro indispensable para la realización del balance hídrico, ya que en base a ésta se determinara el exceso, el déficit y el almacenamiento del agua en el suelo.

En el Cuadro 14 se muestran los resultados de las CAA de las estaciones meteorológicas, para la estimación de estas se utilizo la Formula, en donde se hace uso de los parámetros de textura y profundidad del suelo.

Para asignar los datos de profundidad y textura del suelo de los pozos de exploración a las estaciones meteorológicas se realizaron Polígonos de Thiessen con el software ArcMap 10 utilizando la herramienta Create Thiessen Polygons (Figura 2A), los cuales generaron un área de influencia para cada pozo en base a la distancia entre ellos, se asigno el valor de los datos del pozo a las estaciones que caían dentro de su área de influencia.

**Cuadro 14. Estimación de la CAA de las estaciones meteorológicas**

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	PROFUNDIDAD (cm)	% ARCILLA	% LIMO	% ARENA	f <sub>vaa</sub> (cm/cm)	CAA (mm)
15001	Acambay, Acambay	53	30	34	36	0.190	101
15008	Atenco, Texcoco	101	34	20	46	0.175	177
15011	Atarasquillo, Lerma	125	6	32	62	0.135	169
15013	Calacoaya, Tlalnepantla	13	14	52	34	0.175	23
15014	Chapulhuac, Oztolotepec	125	2	30	68	0.124	155
15017	Coatepec de los Olivos	49	42	16	42	0.196	96
15020	Chalco, Chalco	101	28	34	38	0.180	182
15022	Chiconautla, Ecatepec	101	34	18	48	0.176	178
15024	Presa Danxho, Jilotepec	40	30	28	42	0.180	72
15027	El salitre (San Bartolo)	13	14	52	34	0.175	23
15028	El Tajo, Tequisquiac	40	30	28	42	0.180	72
15029	El Tejocote (Atlacomulco)	101	34	26	40	0.185	187
15033	Huixquilucan	125	10	28	62	0.135	169
15040	Km 2+120 (Bombas)	125	20	20	60	0.145	181
15041	Km 27+250 Gran Canal	101	34	18	48	0.180	182
15042	Km. 46+930 Gran Canal	40	30	28	42	0.180	72
15044	La Grande (Texcoco)	101	34	20	46	0.180	182
15047	Las Arboledas (R. Tuipan)	13	14	52	34	0.175	23
15050	Los Reyes, La Paz	101	34	22	44	0.180	182
15057	Mimiapan, Xonacatlan	125	2	30	68	0.125	156
15058	Molinito (San Bartolo)	13	14	52	34	0.175	23
15059	Molino Blanco, Naucalpan	13	14	52	34	0.175	23
15071	Presa el Tigre, San B.M.	95	24	32	44	0.175	166
15073	Psa. Guadalupe, Tultitlan	101	50	28	22	0.220	222
15074	Presa la Concepción	101	44	24	32	0.210	212
15077	Presa Totolica, Naucalpan	13	14	52	34	0.175	23
15081	Presa Alemán A. Tepotzo	101	44	24	32	0.210	212
15083	San Andrés, Texcoco	101	56	22	22	0.225	227
15090	San Jerónimo Xonacahuacan	101	38	22	40	0.190	192
15092	San Juan Ixhuatepec	125	30	24	46	0.175	219
15094	San Luis Ameca	101	34	30	36	0.190	192
15095	San Luis Ayucan	13	14	52	34	0.175	23
15101	S. M. Tlaixpan, Texcoco	38	10	30	60	0.140	53
15103	San Pedro Nexapa, Amecame	101	6	14	80	0.103	104
15106	San Rafael, Tlalmanalco	101	6	18	76	0.110	111
15114	Santiago Tlazala	13	14	52	34	0.175	23
15115	Santo Tomas Teoloyucan	37	28	28	44	0.170	63
15124	Tepexpan, Tepexpan	101	34	20	46	0.180	182
15127	Totolica (S. Bartolo), N.	13	14	52	34	0.175	23
15129	Tultepec, Tultepec	101	50	28	22	0.220	222
15167	El Tejocote (Texcoco)	101	34	26	40	0.190	192
15170	Chapingo, Texcoco	101	56	22	22	0.225	227
15231	Psa. Iturbide, Oztolotepe	125	2	30	68	0.124	155
15251	Atlacomulco (Prepa)	101	38	22	40	0.190	192
9002	Ajusco, Tlalpan	101	24	18	58	0.150	152
9003	Aquiles Serdán 46 (Azca)	13	14	52	34	0.175	23
9007	Cincel 42 (Col. Sevilla)	101	22	10	68	0.130	131

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	PROFUNDIDAD (cm)	% ARCILLA	% LIMO	% ARENA	f <sub>vaa</sub> (cm/cm)	CAA (mm)
9009	Col. Agrícola Oriental	101	36	22	42	0.185	187
9012	Col. Escandón	125	30	24	46	0.175	219
9013	Col. Moctezuma (SMN)	101	36	22	42	0.185	187
9014	Col. Santa Úrsula Coapa	101	18	30	52	0.155	157
9019	Desierto de los Leones	101	24	16	60	0.150	152
9020	Desv. Alta al Pedregal	101	24	18	58	0.150	152
9021	Egipto 7 (Azcapotzalco)	13	14	52	34	0.175	23
9022	Km. 39.5 a Cuernavaca	125	16	40	44	0.165	206
9025	Hda. La Patera G.A. Mader	13	14	52	34	0.175	23
9026	Morelos 77 (Ixtapalapa)	101	34	22	44	0.180	182
9029	Km. 6+250 Gran Canal	125	22	24	54	0.155	194
9030	La Venta Cuajimalpa (SMN)	101	18	30	52	0.155	157
9032	Milpa Alta, Milpa Alta	101	20	22	58	0.145	146
9034	Moyoguarda (Xochimilco)	101	34	30	36	0.190	192
9037	Presa Ansaldo, Contreras	101	24	16	60	0.150	152
9038	Presa Mixcoac, Mixcoac	101	18	30	52	0.155	157
9039	Presa Tacubaya, Tacubaya	101	24	16	60	0.150	152
9041	San Fco. Tlalne (Xochi)	125	18	32	50	0.158	198
9042	San Gregorio Atlap. Xoch	101	28	34	38	0.180	182
9043	Col. San Juan de Aragón	101	22	10	68	0.130	131
9047	Col. Tacuba, Tacuba	13	14	52	34	0.175	23
9049	Tarango (Villa Obregón)	101	18	30	52	0.155	157
13001	Acayuca, Zapotlán de J.	105	20	22	58	0.145	152
13002	Apán, Apán (DGE)	101	48	30	22	0.218	220
13006	Ciudad Sahagún	101	42	26	32	0.208	210
13008	El Manantial, Tizayuca	40	30	28	42	0.180	72
13017	Mineral del Chico	49	28	18	54	0.160	78
13027	San Jeronimo Tepeapulco	60	56	14	30	0.225	135
13029	San Lorenzo Zayula	101	22	38	40	0.175	177
13033	Singuilucan, Singuilucan	30	22	26	52	0.160	48
13035	Tezontepec, Tezontepec	53	32	32	36	0.190	101
13037	Tlanalapan, Tlanalapan	30	22	26	52	0.160	48
13039	Tolcayuca, Tolcayuca	53	30	34	36	0.190	101
13043	Zempoala, Zempoala	30	22	26	52	0.160	48
13047	Tezontepec, Tezontepec	53	32	32	36	0.190	101
13079	Presa el Girón, Epazoyuca	33	18	28	54	0.150	50
13085	Presa Tezoyo, Almoloya	30	30	40	30	0.195	59
13089	Tepeji, Tepeji del Rio	37	28	28	44	0.170	63
13116	El Sembo, Huasca Ocampo	49	32	28	40	0.185	91

## 6.5 Balance Hídrico

El balance hídrico fue calculado a dos niveles de probabilidad (70% y 20%) de excedencia de lluvia, en el Cuadro se observa que para la probabilidad de 20% se presentan excesos mientras que para la probabilidad de 70% no se presentan excesos en la mayoría de las estaciones. El déficit se ve más evidente en la zona norte y centro de la región de estudio principalmente a la probabilidad de 70%.

En los Cuadros 15 al 24, en la columna uno y dos se muestra la duración del periodo de crecimiento, en la columna tres la Evapotranspiración máxima del cultivo que fue calculada con la Ecuación (23), la precipitación a los dos niveles de probabilidad (0.7 y 0.2) se realizó por el método de la raíz cubica.

El balance hídrico que se presenta en los Cuadros 15 al 24, en la columna cinco se calculó mediante el balance hídrico simplificado en base a la Ecuación (3). Las deficiencias, almacenamientos y excesos se calcularon a partir de las Ecuaciones (4, 5 y 6) respectivamente, en donde si el balance es positivo y menor que la capacidad de almacenamiento del suelo (CAA) hay almacenamientos y por último si el balance resulta mayor de la CAA hay excesos, la explicación anterior aplica para todos los cuadros de resultados de balance hídrico.

A continuación se presenta un ejemplo de Balance Hídrico para cada cultivo (Frijol, Haba, Maíz, Papa y Trigo) de la estación 15001.

**Balance hídrico simplificado para el cultivo de Frijol a dos niveles de probabilidad de excedencia de lluvia estación 15001 Acambay, Acambay, para una capacidad de almacenamiento de agua de 101 mm.**

**Cuadro 15. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 70% para Frijol, estación 15001.**

Mes	Décadas	Etmax (0.3)	Precipitación (0.7)	Balance	Déficit	Ha	Excesos
Junio	16	17.19	12.10	-5.08	-5.08	0	0
	17	16.68	19.43	2.75	0	2.75	0
	18	28.11	26.32	0.96	0	0.96	0
Julio	19	48.74	15.16	-32.62	-32.62	0	0
	20	70.62	29.98	-40.64	-40.64	0	0
	21	89.02	23.28	-65.74	-65.74	0	0
Agosto	22	79.68	29.09	-50.60	-50.60	0	0
	23	78.85	26.10	-52.75	-52.75	0	0
	24	85.73	30.35	-55.38	-55.38	0	0
Septiembre	25	61.45	14.05	-47.41	-47.41	0	0
	26	31.39	9.94	-21.46	-21.46	0	0
TOTAL		607.46	235.79		-371.68		0

**Cuadro 16. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 20% para Frijol, estación 15001.**

Mes	Décadas	Etmax (0.8)	Precipitación (0.2)	Balance	Déficit	Ha	Excesos
Junio	16	15.11	40.08	24.97	0	24.97	0
	17	14.77	78.90	89.10	0	89.10	0
	18	24.99	79.06	143.16	0	101	42.16
Julio	19	44.65	64.57	120.91	0	101	19.91
	20	64.83	73.36	109.53	0	101	8.53
	21	81.68	76.78	96.10	0	96.10	0
Agosto	22	73.20	68.39	91.29	0	91.29	0
	23	72.81	72.68	91.16	0	91.16	0
	24	78.11	65.99	79.04	0	79.04	0
Septiembre	25	56.19	70.62	93.48	0	93.48	0
	26	28.27	60.61	125.82	0	101	24.82
TOTAL		554.61	751.04		0		95.43

**Cuadro 17. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 70% para Haba, estación 15001.**

Mes	Décadas	Etmax (0.3)	Precipitación (0.7)	Balance	Déficit	Ha	Excesos
Junio	16	16.69	12.10	-4.58	-4.58	0	0
	17	16.22	19.43	3.21	0	3.21	0
	18	27.37	26.32	2.16	0	2.16	0
Julio	19	47.77	15.16	-30.45	-30.45	0	0
	20	69.24	29.98	-39.27	-39.27	0	0
	21	87.28	23.28	-63.99	-63.99	0	0
Agosto	22	78.15	29.09	-49.06	-49.06	0	0
	23	77.42	26.10	-51.32	-51.32	0	0
	24	82.09	30.35	-51.74	-51.74	0	0
Septiembre	25	69.97	14.05	-55.92	-55.92	0	0
	TOTAL	572.19	225.85		-346.34		0

**Cuadro 18. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 20% para Haba, estación 15001.**

Mes	Décadas	Etmax (0.8)	Precipitación (0.2)	Balance	Déficit	Ha	Excesos
Junio	16	14.65	40.08	25.43	0	25.43	0
	17	14.35	78.90	89.98	0	89.98	0
	18	24.30	79.06	144.73	0	101	43.73
Julio	19	43.74	64.57	121.83	0	101	20.83
	20	63.53	73.36	110.83	0	101	9.83
	21	80.03	76.78	97.75	0	97.75	0
Agosto	22	71.75	68.39	94.39	0	94.39	0
	23	71.45	72.68	95.62	0	95.62	0
	24	74.75	65.99	86.86	0	86.86	0
Septiembre	25	63.93	70.62	93.55	0	93.55	0
	TOTAL	522.48	690.43		0		74.39

**Cuadro 19. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 70% para Maíz, estación 15001.**

Mes	Décadas	Etmax (0.3)	Precipitación (0.7)	Balance	Déficit	Ha	Excesos
Junio	16	16.69	12.10	-4.58	-4.58	0	0
	17	16.22	19.43	3.21	0	3.21	0
	18	15.71	26.32	13.82	0	13.82	0
Julio	19	23.05	15.16	5.93	0	5.93	0
	20	39.27	29.98	-3.36	-3.36	0	0
	21	60.52	23.28	-37.24	-37.24	0	0
Agosto	22	70.16	29.09	-41.07	-41.07	0	0
	23	77.42	26.10	-51.32	-51.32	0	0
	24	83.92	30.35	-53.57	-53.57	0	0
Septiembre	25	74.85	14.05	-60.80	-60.80	0	0
	26	74.20	9.94	-64.26	-64.26	0	0
	27	65.85	4.88	-60.97	-60.97	0	0
Octubre	28	49.85	3.20	-46.66	-46.66	0	0
	29	38.46	0.55	-37.91	-37.91	0	0
TOTAL		706.17	244.41		-461.76		0

**Cuadro 20. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 20% para Maíz, estación 15001.**

Mes	Décadas	Etmax (0.8)	Precipitación (0.2)	Balance	Déficit	Ha	Excesos
Junio	16	14.65	40.08	25.43	0	25.43	0
	17	14.35	78.90	89.98	0	89.98	0
	18	13.95	79.06	155.08	0	101	54.08
Julio	19	21.10	64.57	144.46	0	101	43.46
	20	36.03	73.36	138.33	0	101	37.33
	21	55.50	76.78	122.28	0	101	21.28
Agosto	22	64.42	68.39	104.98	0	101	3.98
	23	71.45	72.68	102.23	0	101	1.23
	24	76.41	65.99	90.58	0	90.58	0
Septiembre	25	68.39	70.62	92.81	0	92.81	0
	26	66.75	60.61	86.67	0	86.67	0
	27	54.39	54.10	86.38	0	86.38	0
Octubre	28	42.40	41.09	85.08	0	85.08	0
	29	33.96	27.92	79.04	0	79.04	0
TOTAL		633.76	874.15		0		161.36

**Cuadro 21. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 70% para Papa, estación 15001.**

Mes	Décadas	Etmax (0.3)	Precipitación (0.7)	Balance	Déficit	Ha	Excesos
Junio	16	16.69	12.10	-4.58	-4.58	0	0
	17	16.22	19.43	3.21	0	3.21	0
	18	15.71	26.32	13.82	0	13.82	0
Julio	19	25.72	15.16	3.25	0	3.25	0
	20	47.37	29.98	-14.14	-14.14	0	0
	21	75.25	23.28	-51.97	-51.97	0	0
Agosto	22	78.15	29.09	-49.06	-49.06	0	0
	23	77.42	26.10	-51.32	-51.32	0	0
	24	83.92	30.35	-53.57	-53.57	0	0
Septiembre	25	74.85	14.05	-60.80	-60.80	0	0
	26	70.12	9.94	-60.18	-60.18	0	0
	27	59.13	4.88	-54.25	-54.25	0	0
Octubre	28	46.54	3.20	-43.35	-43.35	0	0
	TOTAL	687.08	243.86		-443.22		0

**Cuadro 22. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 20% para Papa, estación 15001.**

Mes	Décadas	Etmax (0.8)	Precipitación (0.2)	Balance	Déficit	Ha	Excesos
Junio	16	14.65	40.08	25.43	0	25.43	0
	17	14.35	78.90	89.98	0	89.98	0
	18	13.95	79.06	155.08	0	101	54.08
Julio	19	23.55	64.57	142.02	0	101	41.02
	20	43.46	73.36	130.90	0	101	29.90
	21	69.00	76.78	108.78	0	101	7.78
Agosto	22	71.75	68.39	97.65	0	97.65	0
	23	71.45	72.68	98.87	0	98.87	0
	24	76.41	65.99	88.45	0	88.45	0
Septiembre	25	68.39	70.62	90.69	0	90.69	0
	26	63.09	60.61	88.21	0	88.21	0
	27	48.84	54.10	93.48	0	93.48	0
Octubre	28	39.58	41.09	94.99	0	94.99	0
	TOTAL	618.47	846.24		0		132.78

**Cuadro 23 Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 70% para Trigo, estación 15001.**

Mes	Décadas	Etmax (0.3)	Precipitación (0.7)	Balance	Déficit	Ha	Excesos
Junio	16	16.69	12.10	-4.58	-4.58	0	0
	17	16.22	19.43	3.21	0	3.21	0
	18	27.37	26.32	2.16	0	2.16	0
Julio	19	47.77	15.16	-30.45	-30.45	0	0
	20	69.24	29.98	-39.27	-39.27	0	0
	21	87.28	23.28	-63.99	-63.99	0	0
Agosto	22	78.15	29.09	-49.06	-49.06	0	0
	23	77.42	26.10	-51.32	-51.32	0	0
	24	83.92	30.35	-53.57	-53.57	0	0
Septiembre	25	74.85	14.05	-60.80	-60.80	0	0
	26	74.20	9.94	-64.26	-64.26	0	0
	27	61.99	4.88	-57.11	-57.11	0	0
Octubre	28	39.69	3.20	-36.50	-36.50	0	0
	TOTAL	754.78	243.86		-510.92		0

**Cuadro 24. Balance Hídrico con probabilidad de lluvia del 20% para Trigo, estación 15001.**

Mes	Décadas	Etmax (0.8)	Precipitación (0.2)	Balance	Déficit	Ha	Excesos
Junio	16	14.65	40.08	25.43	0	25.43	0
	17	14.35	78.90	89.98	0	89.98	0
	18	24.30	79.06	144.73	0	101	43.73
Julio	19	43.74	64.57	121.83	0	101	20.83
	20	63.53	73.36	110.83	0	101	9.83
	21	80.03	76.78	97.75	0	97.75	0
Agosto	22	71.75	68.39	94.39	0	94.39	0
	23	71.45	72.68	95.62	0	95.62	0
	24	76.41	65.99	85.20	0	85.20	0
Septiembre	25	68.39	70.62	87.43	0	87.43	0
	26	66.75	60.61	81.29	0	81.29	0
	27	51.21	54.10	84.19	0	84.19	0
Octubre	28	33.75	41.09	91.53	0	91.53	0
	TOTAL	680.32	846.24		0		74.39

De acuerdo al Cuadro 25 se puede observar que para la probabilidad de 70% de lluvias presenta más deficiencias de humedad para todos los cultivos salvo la estación 15231 que no presenta deficiencias a ninguna probabilidad y para ningún cultivo.

Al 20% de probabilidad las deficiencias disminuyen y aumenta el número de estaciones con cero deficiencias.

En la Figura 13A para la frijol al 70% podemos observar que la mayor parte de la cuenca presenta deficiencias de entre 300 y 550 mm, solamente una pequeña parte el suroeste presenta deficiencias de entre 0 y 100 mm. En la Figura 14A no se presentan deficiencias salvo un pequeña zona al norte de la cuenca del entre 250 a 230 mm.

De Acuerdo la Figura 15A para la Haba al 70% podemos observar que la mayor parte de la cuenca presenta deficiencias que varían entre 280 y 540 mm, solamente una pequeña parte el suroeste presenta deficiencias de entre 0 y 100 mm. En la Figura 16A para Haba no se presentan deficiencias solo una pequeña zona al norte de la cuenca con deficiencias que van de los 190 a 230 mm.

En la Figura 17A para la estación de crecimiento de Maíz a una probabilidad de 70% vemos claramente que la deficiencia aumenta ya que su ciclo es más largo y las deficiencias están en un rango de los 300 a los 700 mm. Para la probabilidad del 20% (Figura 18A) la zona sur no presenta deficiencias o son muy bajas, mientras que la zona centro tiene deficiencias de entre 50 y 190 mm.

Para el cultivo de Papa a una probabilidad de 70% y 20% (Figuras 19A y 20A respectivamente) se observa que tienen la misma tendencia que el Maíz y muy parecido rango de deficiencias ya que la duración de su ciclo es muy parecido.

Las deficiencias para el cultivo de Trigo a 70% de probabilidad (Figura 21A) aumentan más que para ningún otro cultivo estudiado y varían de entre los 400 a los 800 mm en la mayoría de la cuenca, la región del suroeste presenta menos deficiencias. En la Figura 22A la zona suroeste presenta poca deficiencias pero en la mayor parte hay deficiencias que van de los 100 a los 320 mm.

**Cuadro 25. Deficiencias de Humedad a dos niveles de probabilidad (70 y 20%)**

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAIZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
15001	19.967	-98.850	Acambay, Acambay	359.11	0.00	346.34	0.00	461.76	0.00	443.22	0.00	510.92	0.00
15008	19.550	-98.917	Atenco, Texcoco	459.44	124.92	448.82	132.68	573.84	140.48	553.94	147.59	626.68	214.87
15011	19.317	-99.467	Atarasquillo, Lerma	217.51	0.00	224.71	0.00	327.72	0.00	306.23	0.00	374.11	0.00
15013	19.477	-99.214	Calacoaya, Tlalnepantla	421.63	63.62	420.56	71.56	535.70	90.63	515.39	82.62	589.03	108.95
15014	19.450	-99.483	Chapulhuac, Oztolotepec	306.73	0.00	297.94	0.00	413.97	0.00	395.40	0.00	457.97	0.00
15017	19.383	-98.850	Coatepec de los Olivos	394.81	58.68	383.99	66.05	506.17	92.77	485.88	84.07	553.49	134.70
15020	19.267	-98.900	Chalco, Chalco	417.35	67.30	408.98	75.16	533.89	83.47	514.96	87.02	586.66	153.23
15022	19.650	-99.000	Chiconautla, Ecatepec	486.43	104.53	468.06	112.03	598.67	116.51	580.56	122.02	652.09	187.76
15024	19.883	-99.200	Presa Danxho, Jilotepec	466.44	0.00	454.17	0.00	587.39	0.00	567.97	0.00	651.67	5.97
15027	19.500	-99.300	El salitre (San Bartolo)	296.37	6.92	297.05	5.17	412.68	25.71	392.25	9.32	445.88	24.00
15028	19.917	-99.133	El Tajo, Tequisquiac	463.39	87.25	455.86	95.09	583.02	125.77	561.74	119.45	634.47	141.06
15029	19.450	-98.900	El Tejocote (Atlacomulco)	397.88	0.00	382.38	0.00	506.35	0.00	487.87	0.00	556.49	0.00
15033	19.367	-99.350	Huixquilucan	68.29	0.00	75.64	0.00	150.38	0.00	137.36	0.00	198.53	0.00
15040	19.567	-99.017	Km 2+120 (Bombas)	515.31	147.33	493.99	151.72	640.78	187.27	618.63	185.29	693.97	253.69
15041	19.667	-99.067	Km 27+250 Gran Canal	477.50	86.01	461.49	93.83	590.01	86.19	571.80	87.95	644.12	154.16
15042	19.800	-99.100	Km. 46+930 Gran Canal	494.62	115.29	479.84	123.18	606.35	148.26	587.04	143.94	659.60	177.51
15044	19.550	-98.883	La Grande (Texcoco)	450.90	92.51	440.95	100.04	557.59	88.65	539.46	93.91	610.98	160.35
15047	19.567	-99.217	Las Arboledas (R. Tuipan)	427.19	75.69	412.94	83.38	543.07	125.96	522.23	108.11	594.10	131.05
15050	19.367	-98.983	Los Reyes, La Paz	476.63	134.40	462.84	142.59	591.99	149.62	571.87	149.08	645.68	216.70
15057	19.417	-99.500	Mimiapan, Xonacatlan	155.14	0.00	162.18	0.00	226.63	0.00	214.37	0.00	272.49	0.00
15058	19.450	-99.250	Molinito (San Bartolo)	336.61	10.89	331.13	12.73	479.68	77.17	454.76	50.28	510.88	60.27
15059	19.483	-99.217	Molino Blanco, Naucalpan	372.84	29.39	368.58	29.17	480.92	69.03	461.65	43.51	534.64	67.43
15071	19.667	-99.450	Presa el Tigre, San B.M.	323.81	0.00	316.33	0.00	424.41	0.00	407.18	0.00	471.44	0.00
15073	19.633	-99.250	Psa. Guadalupe, Tultitlan	465.47	47.53	458.10	55.72	580.21	24.54	561.09	29.65	636.31	99.68

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAIZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
15074	19.700	-99.283	Presa la Concepción	438.85	41.95	427.13	49.78	546.34	8.70	528.67	20.75	600.93	87.95
15077	19.450	-99.283	Presa Totolica, Naucalpan	283.08	0.00	284.96	0.00	406.94	13.28	387.40	0.00	440.94	0.00
15081	19.717	-99.233	Presa Alemán A. Tepotzo	458.78	46.73	444.09	54.56	575.53	57.10	556.51	59.73	628.85	127.08
15083	19.517	-98.883	San Andrés, Texcoco	469.82	154.99	459.59	162.68	577.00	166.44	558.72	172.12	630.77	239.18
15090	19.750	-98.950	San Jerónimo Xonacahuacan	500.45	129.72	486.21	137.60	619.28	142.75	597.66	146.25	671.34	213.40
15092	19.517	-99.133	San Juan Ixhuatepec	476.18	89.22	459.17	97.09	592.72	104.65	571.86	98.10	645.79	166.15
15094	19.183	-98.967	San Luis Ameca	364.01	15.29	356.64	23.00	467.89	5.06	449.02	7.15	518.45	70.84
15095	19.517	-99.350	San Luis Ayucan	147.52	0.00	154.76	0.00	263.88	0.00	237.35	0.00	265.32	0.00
15101	19.517	-98.817	S. M. Tlaixpan, Texcoco	418.37	97.67	405.77	104.78	520.39	131.74	503.34	129.24	570.13	160.09
15103	19.083	-98.733	San Pedro Nexapa, Amecameca	243.19	0.00	245.12	0.00	332.16	0.00	314.06	0.00	372.87	0.00
15106	19.200	-98.750	San Rafael, Tlalmanalco	146.36	0.00	153.67	0.00	221.16	0.00	206.51	0.00	267.70	0.00
15114	19.583	-99.433	Santiago Tlazala	120.53	0.00	127.85	0.00	224.91	0.00	204.19	0.00	234.28	0.00
15115	19.767	-99.350	Santo Tomas Teoloyucan	501.09	145.46	486.51	153.43	616.64	172.90	597.19	179.22	671.75	212.97
15124	19.617	-98.917	Tepexpan, Tepexpan	474.58	102.77	457.43	110.14	587.15	108.30	567.82	112.82	640.62	180.54
15127	19.467	-99.250	Totolica (S. Bartolo), N.	373.44	24.39	365.00	26.19	497.59	79.22	473.16	59.33	544.96	71.42
15129	19.683	-99.100	Tultepec, Tultepec	530.67	82.25	511.49	90.32	652.10	103.78	630.33	97.81	705.68	163.91
15167	19.450	-98.900	El Tejocote (Texcoco)	434.89	108.58	419.63	115.87	543.14	120.43	524.26	123.88	593.64	188.39
15170	19.500	-98.883	Chapingo, Texcoco	429.96	96.48	421.25	104.28	539.78	107.54	520.35	110.99	592.78	177.23
15231	19.450	-99.483	Psa. Iturbide, Oztolotepec	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15251	19.783	-98.867	Atacomulco (Prepa)	401.91	0.00	382.85	0.00	508.89	0.00	492.12	0.00	560.50	10.03
9002	19.217	-99.200	Ajusco, Tlalpan	81.59	0.00	80.03	0.00	143.02	0.00	127.20	0.00	181.03	0.00
9003	19.450	-99.183	Aquiles Serdán 46 (Azca)	425.19	62.24	421.31	70.29	544.74	96.62	523.35	84.56	599.32	110.64
9007	19.417	-99.117	Cinzel 42 (Col. Sevilla)	530.84	108.03	515.31	116.40	656.15	130.40	634.99	120.51	713.59	192.56
9009	19.400	-99.083	Col. Agrícola Oriental	560.35	161.94	540.95	169.83	696.15	202.61	671.22	195.38	750.45	264.96
9012	19.500	-99.133	Col. Escandón	410.83	0.00	411.05	0.00	529.13	0.00	507.92	0.00	585.00	25.32
9013	19.433	-99.100	Col. Moctezuma (SMN)	537.01	105.32	518.88	114.01	669.85	129.76	646.11	123.33	727.14	196.58

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAIZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
9014	19.300	-99.117	Col. Santa Úrsula Coapa	389.13	0.00	380.46	0.00	514.12	0.00	491.02	0.00	565.46	0.00
9019	19.300	-99.300	Desierto de los Leones	25.72	0.00	29.35	0.00	56.35	0.00	47.14	0.00	101.66	0.00
9020	19.283	-99.250	Desv. Alta al Pedregal	232.20	0.00	238.72	0.00	337.05	0.00	317.39	0.00	385.53	0.00
9021	19.467	-99.183	Egipto 7 (Azcapotzalco)	441.08	77.52	434.79	85.88	563.37	102.65	562.20	90.76	620.16	123.14
9022	19.133	-99.183	Km. 39.5 a Cuernavaca	31.11	0.00	37.84	0.00	90.49	0.00	79.28	0.00	134.32	0.00
9025	19.483	-99.150	Hda. La Patera G.A. Madero	486.53	140.86	474.51	148.77	608.95	211.81	586.58	196.94	660.94	225.87
9026	19.367	-99.083	Morelos 77 (Ixtapalapa)	495.57	135.01	483.47	143.07	614.20	140.63	594.23	140.19	670.64	211.12
9029	19.483	-99.083	Km. 6+250 Gran Canal	502.10	138.41	487.62	146.73	622.29	152.45	601.14	148.97	677.35	218.90
9030	19.333	-99.300	La Venta Cuajimalpa (SMN)	121.56	0.00	129.50	0.00	187.73	0.00	176.38	0.00	242.50	0.00
9032	19.183	-99.017	Milpa Alta, Milpa Alta	379.68	20.90	369.14	28.52	490.84	45.14	472.06	37.43	540.87	101.14
9034	19.283	-99.100	Moyoguarda (Xochimilco)	409.39	53.58	405.95	61.36	525.00	38.73	505.88	41.49	578.79	108.63
9037	19.317	-99.217	Presa Ansaldo, Contreras	265.57	0.00	269.86	0.00	365.56	0.00	349.21	0.00	418.93	0.00
9038	19.367	-99.267	Presa Mixcoac, Mixcoac	238.07	0.00	244.54	0.00	337.27	0.00	318.54	0.00	385.74	0.00
9039	19.383	-99.217	Presa Tacubaya, Tacubaya	335.08	0.00	340.97	0.00	434.45	0.00	415.84	0.00	487.85	0.00
9041	19.200	-99.117	San Fco. Tlalne (Xochi)	230.29	0.00	229.83	0.00	329.63	0.00	310.18	0.00	371.67	0.00
9042	19.250	-99.050	San Gregorio Atlap. Xoch	466.85	0.96	456.33	9.08	575.31	0.00	556.97	0.00	638.22	56.64
9043	19.467	-99.067	Col. San Juan de Aragón	497.52	155.35	483.11	163.62	617.33	171.87	597.08	170.92	673.19	241.55
9047	19.450	-99.183	Col. Tacuba, Tacuba	484.13	84.89	474.90	93.00	601.54	117.23	579.93	101.91	656.90	136.82
9049	19.367	-99.283	Tarango (Villa Obregón)	391.08	0.00	386.56	0.00	509.18	0.00	488.46	0.00	564.16	0.00
13001	20.067	-98.850	Acayuca, Zapotlan de J.	548.17	128.42	526.39	130.60	669.22	168.79	647.02	163.37	713.00	219.88
13002	19.717	-98.450	Apan, Apan (DGE)	473.24	87.59	456.67	95.04	585.89	115.66	564.95	115.43	633.95	179.12
13006	19.767	-98.583	Ciudad Sahagun	482.32	147.71	465.47	147.76	594.40	192.47	574.54	188.04	641.92	250.44
13008	19.850	-98.950	El Manantial, Tizayuca	519.54	172.72	505.89	180.25	632.19	207.57	612.91	201.98	684.78	262.21
13017	20.217	-98.733	Mineral del Chico	172.13	0.00	179.35	0.00	218.71	0.00	213.10	0.00	275.70	0.00
13027	19.817	-98.483	San Jerónimo Tepeapulco	431.52	0.00	421.32	0.00	543.11	48.57	523.24	34.98	587.86	76.26
13029	19.967	-98.350	San Lorenzo Zayula	497.83	64.69	484.70	71.66	596.77	39.17	579.72	48.32	644.89	106.57

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAIZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
13033	19.967	-98.517	Singuilucan, Singuilucan	466.82	128.61	452.47	135.50	570.84	163.68	550.93	155.92	613.04	186.09
13035	19.867	-98.817	Tezontepec, Tezontepec	555.10	200.85	533.73	204.98	669.31	240.37	651.03	237.99	723.77	303.33
13037	19.817	-98.600	Tlanalapan, Tlanalapan	508.39	159.93	491.23	164.50	617.74	237.93	598.77	227.95	667.59	259.73
13039	19.950	-98.917	Tolcayuca, Tolcayuca	533.52	0.00	512.96	0.00	659.76	0.00	636.02	0.00	703.39	0.00
13043	19.900	-98.650	Zempoala, Zempoala	518.52	167.28	498.47	171.40	630.85	248.26	610.29	236.81	678.18	267.68
13047	19.883	-98.833	Tezontepec, Tezontepec	517.43	176.93	498.53	182.63	630.88	216.79	611.35	212.05	681.11	276.88
13079	20.050	-98.650	Presa el Girón, Epazoyuca	527.79	229.77	510.04	236.62	636.48	284.26	616.17	273.51	678.78	327.93
13085	19.585	-98.267	Presa Tezoyo, Almoloya	479.46	87.66	464.20	94.27	578.51	106.67	563.54	105.79	626.78	134.39
13089	19.900	-99.333	Tepeji, Tepeji del Rio	550.64	138.93	533.14	147.10	673.71	186.64	654.71	181.45	732.93	218.11
13116	20.150	-98.567	El Sembo, Huasca Ocampo	406.44	0.00	402.03	0.00	477.27	0.00	463.33	0.00	526.12	0.00

En el Cuadro 26 se presentan los excesos de humedad a los dos niveles de probabilidad para los cinco cultivos estudiados, los excesos se encuentran distribuidos principalmente en la región suroeste en el resto de la cuenca no se presentan excesos de humedad o son muy bajos.

En las Figuras 23A, 25A, 27A, 29A y 31A para los cultivos de Frijol, Haba, Maíz, Papa y Trigo respectivamente a una probabilidad de 70% se observa que siguen la misma tendencia con excesos solo en una pequeña región al suroeste y en la mayor parte de la cuenca los excesos son cero o muy bajos.

En las Figuras 24A, 26A, 28A, 30A y 32A para los cultivos de Frijol, Haba, Maíz, Papa y Trigo respectivamente a una probabilidad de 20% se observa que siguen la misma tendencia con excesos solo en una región al suroeste y dos zonas más pequeñas al norte y al sureste y en la mayor parte de la cuenca los excesos van de 0 a 150mm.

**Cuadro 26. Excesos de humedad a dos niveles de probabilidad (70 y 20%)**

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAÍZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
15001	19.967	-98.850	Acambay, Acambay	0.00	107.24	0.00	74.39	0.00	161.36	0.00	132.78	0.00	74.39
15008	19.550	-98.917	Atenco, Texcoco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15011	19.317	-99.467	Atarasquillo, Ierma	0.00	85.34	0.00	45.62	0.00	132.69	0.00	111.93	0.00	45.99
15013	19.477	-99.214	Calacoaya, Tlalnepantla	0.00	102.03	0.00	97.36	0.00	149.92	0.00	139.12	0.00	97.36
15014	19.450	-99.483	Chapulhuac, Oztolotepec	0.00	25.60	0.00	3.62	0.00	83.45	0.00	57.53	0.00	3.62
15017	19.383	-98.850	Coatepec de los Olivos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.59	0.00	11.25	0.00	0.00
15020	19.267	-98.900	Chalco, Chalco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15022	19.650	-99.000	Chiconautla, Ecatepec	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15024	19.883	-99.200	Presa Danxho, Jilotepec	0.00	94.83	0.00	94.83	0.00	160.32	0.00	133.54	0.00	94.83
15027	19.500	-99.300	El salitre (San Bartolo)	0.00	152.69	0.00	134.44	17.23	205.24	14.51	183.04	0.00	134.44
15028	19.917	-99.133	El Tajo, Tequisquiac	0.00	31.65	0.00	31.65	0.00	87.63	0.00	77.03	0.00	31.65
15029	19.450	-98.900	El Tejocote (Atlacomulco)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	42.89	0.00	23.43	0.00	0.00
15033	19.367	-99.350	Huixquilucan	0.00	331.60	0.00	270.54	0.00	380.25	0.00	360.97	0.00	303.89
15040	19.567	-99.017	Km 2+120 (Bombas)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15041	19.667	-99.067	Km 27+250 Gran Canal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15042	19.800	-99.100	Km. 46+930 Gran Canal	0.00	2.66	0.00	2.66	0.00	47.44	0.00	36.71	0.00	2.66
15044	19.550	-98.883	La Grande (Texcoco)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15047	19.567	-99.217	Las Arboledas (R. Tuipan)	0.00	133.41	0.00	133.41	0.00	183.90	0.00	173.37	0.00	133.41
15050	19.367	-98.983	Los Reyes, La Paz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15057	19.417	-99.500	Mimiapan, Xonacatlan	0.00	482.50	0.00	424.83	0.00	530.90	0.00	514.99	0.00	463.24
15058	19.450	-99.250	Molinito (San Bartolo)	0.00	184.08	0.00	177.37	21.14	260.07	18.19	234.41	0.00	177.37
15059	19.483	-99.217	Molino Blanco, Naucalpan	0.00	129.37	0.00	120.72	0.00	189.54	0.00	163.88	0.00	120.72
15071	19.667	-99.450	Presa el Tigre, San B.M.	0.00	4.15	0.00	0.00	0.00	68.74	0.00	39.04	0.00	0.00
15073	19.633	-99.250	Psa. Guadalupe, Tultitlan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAÍZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
15074	19.700	-99.283	Presa la Concepcion	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15077	19.450	-99.283	Presa Totolica, Naucalpan	0.00	226.55	0.00	186.69	19.08	278.85	16.30	246.54	0.00	182.14
15081	19.717	-99.233	Presa Aleman A. Tepotzo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15083	19.517	-98.883	San Andres, Texcoco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15090	19.750	-98.950	San Jeronimo Xonacahuacan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15092	19.517	-99.133	San Juan Ixhuatepec	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15094	19.183	-98.967	San Luis Ameca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15095	19.517	-99.350	San Luis Ayucan	18.45	467.17	18.45	405.22	59.58	547.65	49.98	526.46	18.45	472.07
15101	19.517	-98.817	S. M. Tlaixpan, Texcoco	0.00	35.16	0.00	35.16	0.00	70.62	0.00	65.42	0.00	35.16
15103	19.083	-98.733	San Pedro Nexapa, Amecameca	0.00	100.54	0.00	97.56	0.00	161.72	0.00	142.24	0.00	97.56
15106	19.200	-98.750	San Rafael, Tlalmanalco	0.00	262.84	0.00	215.38	0.00	326.67	0.00	303.98	0.00	247.02
15114	19.583	-99.433	Santiago Tlazala	29.95	578.66	29.95	504.37	67.65	677.03	59.68	649.69	29.95	595.82
15115	19.767	-99.350	Santo Tomas Teoloyucan	0.00	18.50	0.00	18.50	0.00	53.85	0.00	51.22	0.00	18.50
15124	19.617	-98.917	Tepexpan, Tepexpan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15127	19.467	-99.250	Totolica (S. Bartolo), N.	0.00	174.55	0.00	162.31	5.39	237.44	2.43	217.24	0.00	162.31
15129	19.683	-99.100	Tultepec, Tultepec	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15167	19.450	-98.900	El Tejocote (Texcoco)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15170	19.500	-98.883	Chapingo, Texcoco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15231	19.450	-99.483	Psa. Iturbide, Oztolotepec	0.00	632.72	0.00	550.87	29.94	734.77	9.87	709.91	0.00	660.82
15251	19.783	-98.867	Atacomulco (Prepa)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9002	19.217	-99.200	Ajusco, Tlalpan	0.00	422.08	0.00	355.90	0.00	488.27	0.00	468.40	0.00	419.25
9003	19.450	-99.183	Aquiles Serdan 46 (Azca)	0.00	104.33	0.00	104.33	0.00	162.67	0.00	147.53	0.00	104.33
9007	19.417	-99.117	Cinzel 42 (Col. Sevilla)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.05	0.00	0.00	0.00	0.00
9009	19.400	-99.083	Col. Agricola Oriental	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9012	19.500	-99.133	Col. Escandon	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9013	19.433	-99.100	Col. Moctezuma (SMN)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAÍZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
9014	19.300	-99.117	Col. Santa Ursula Coapa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55.23	0.00	39.13	0.00	0.00
9019	19.300	-99.300	Desierto de los Leones	0.00	466.96	0.00	391.88	0.00	563.92	0.00	541.40	0.00	492.80
9020	19.283	-99.250	Desv. Alta al Pedregal	0.00	174.91	0.00	128.99	0.00	222.53	0.00	201.12	0.00	134.67
9021	19.467	-99.183	Egipto 7 (Azcapotzalco)	0.00	99.88	0.00	97.65	0.00	147.72	0.00	118.67	0.00	97.65
9022	19.133	-99.183	Km. 39.5 a Cuernavaca	0.00	396.81	0.00	339.65	0.00	460.90	0.00	444.43	0.00	399.45
9025	19.483	-99.150	Hda. La Patera G.A. Madero	0.00	86.47	0.00	86.47	0.00	134.14	0.00	123.55	0.00	86.47
9026	19.367	-99.083	Morelos 77 (Ixtapalapa)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9029	19.483	-99.083	Km. 6+250 Gran Canal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9030	19.333	-99.300	La Venta Cuajimalpa (SMN)	0.00	408.91	0.00	335.96	0.00	512.94	0.00	491.95	0.00	431.54
9032	19.183	-99.017	Milpa Alta, Milpa Alta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.56	0.00	0.00	0.00	0.00
9034	19.283	-99.100	Moyoguarda (Xochimilco)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9037	19.317	-99.217	Presa Ansaldo, Contreras	0.00	91.20	0.00	46.52	0.00	138.50	0.00	116.51	0.00	46.36
9038	19.367	-99.267	Presa Mixcoac, Mixcoac	0.00	101.80	0.00	53.85	0.00	155.70	0.00	134.27	0.00	71.89
9039	19.383	-99.217	Presa Tacubaya, Tacubaya	0.00	23.36	0.00	20.43	0.00	90.45	0.00	68.70	0.00	20.43
9041	19.200	-99.117	San Fco. Tlalne (Xochi)	0.00	123.68	0.00	81.34	0.00	169.48	0.00	151.64	0.00	94.18
9042	19.250	-99.050	San Gregorio Atlap. Xoch	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00
9043	19.467	-99.067	Col. San Juan de Aragon	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9047	19.450	-99.183	Col. Tacuba, Tacuba	0.00	122.19	0.00	122.19	0.00	166.34	0.00	155.40	0.00	122.19
9049	19.367	-99.283	Tarango (Villa Obregon)	0.00	56.20	0.00	23.48	0.00	103.52	0.00	78.27	0.00	23.48
13001	20.067	-98.850	Acayuca, Zapotlan de J.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13002	19.717	-98.450	Apan, Apan (DGE)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13006	19.767	-98.583	Ciudad Sahagun	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13008	19.850	-98.950	El Manantial, Tizayuca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.18	0.00	5.60	0.00	0.00
13017	20.217	-98.733	Mineral del Chico	0.00	586.72	0.00	488.51	0.00	773.05	0.00	717.19	0.00	659.61
13027	19.817	-98.483	San Jeronimo Tepeapulco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.40	0.00	18.92	0.00	0.00
13029	19.967	-98.350	San Lorenzo Zayula	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	FRIJOL		HABA		MAÍZ		PAPA		TRIGO	
				70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
13033	19.967	-98.517	Singuilucan, Singuilucan	0.00	22.13	0.00	22.13	0.00	56.24	0.00	48.83	0.00	22.13
13035	19.867	-98.817	Tezontepec, Tezontepec	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13037	19.817	-98.600	Tlanalapan, Tlanalapan	0.00	26.98	0.00	26.98	0.00	60.97	0.00	58.44	0.00	26.98
13039	19.950	-98.917	Tolcayuca, Tolcayuca	0.00	262.79	0.00	232.31	0.00	319.30	0.00	287.87	0.00	225.92
13043	19.900	-98.650	Zempoala, Zempoala	0.00	14.52	0.00	14.52	0.00	48.05	0.00	44.34	0.00	14.52
13047	19.883	-98.833	Tezontepec, Tezontepec	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13079	20.050	-98.650	Presa el Giron, Epazoyuca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.87	0.00	2.61	0.00	0.00
13085	19.585	-98.267	Presa Tezoyo, Almoloya	0.00	31.97	0.00	31.97	0.00	64.37	0.00	60.24	0.00	31.97
13089	19.900	-99.333	Tepeji, Tepeji del Rio	0.00	49.41	0.00	49.41	0.00	96.36	0.00	85.17	0.00	49.41
13116	20.150	-98.567	El Sembo, Huasca Ocampo	0.00	63.82	0.00	63.82	0.00	127.01	0.00	105.24	0.00	63.82

## 6.6 Índice de Satisfacción de Necesidades Hídricas

El índice de satisfacción de necesidades hídricas en los cultivos permite dar un diagnóstico de la factibilidad de adaptación de un cultivo en una región, ya que indica el porcentaje con que la humedad del suelo satisface las necesidades hídricas de los cultivos, en el presente trabajo se obtuvo dicho índice para el Frijol, Haba, Maíz, Papa, y Trigo a dos niveles de probabilidad de excedencia de lluvia.

El Índice hídrico para cada estación se puede clasificar en cuatro categorías como se muestra en el Cuadro 27.

**Cuadro 27. Categorías del Índice de satisfacción de necesidades hídricas.**

<b>Índice de Satisfacción de Necesidades Hídricas (%)</b>	<b>Categoría</b>
>90	Excelente
75-90	Bueno
60-75	Regular
<60	Malo

**Cuadro 28. Índice de Satisfacción de necesidades hídricas para los cultivos de Frijol, Haba, Maíz, Papa y trigo a dos niveles de probabilidad de lluvia.**

Clave	Nombre de la Estación	FRIJOL		HABA		MAIZ		PAPA		TRIGO	
		70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
15001	Acambay, Acambay	39.6	100	39.5	100	34.6	100	35.5	100	32.3	100
15008	Atenco, Texcoco	28.4	78.9	27.2	76.7	24.9	79.7	25.4	78.3	23.2	71.2
15011	Atarasquillo, Ierma	63.8	100	61.1	100	54.6	100	56.2	100	51.2	100
15013	Calacoaya, Tlalnepantla	35	89.4	32.5	87.6	30.6	87	31.4	87.9	28.6	85.5
15014	Chapulhuac, Oztolotepec	46.2	100	45.8	100	39.5	100	40.3	100	36.8	100
15017	Coatepec de los Olivos	34.1	89.4	33.4	87.6	29.5	85.8	30.1	86.8	27.4	80.7
15020	Chalco, Chalco	34.4	88.3	33.2	86.5	29.8	87.8	30.3	86.9	27.6	79.1
15022	Chiconautla, Ecatepec	23	81.7	22.8	79.7	20.4	82.7	20.6	81.4	18.8	74
15024	Presa Danxho, Jilotepec	36.5	100	35.8	100	32.5	100	33	100	30.1	99.2
15027	El salitre (San Bartolo)	50.5	98.8	48.4	99	42.1	96.1	43.4	98.5	41.4	96.6
15028	El Tajo, Tequisquiac	27.6	85.3	26	83.4	23.8	81.8	24.5	82.3	22.3	81
15029	El Tejocote (Atlacomulco)	33.8	100	33.9	100	29	100	29.8	100	27.1	100
15033	Huixquilucan	87.7	100	85.8	100	77.3	100	78.6	100	71.8	100
15040	Km 2+120 (Bombas)	22.8	75.7	23	74.1	19.6	73.7	20.1	73.3	18.3	66.8
15041	Km 27+250 Gran Canal	25.3	85.2	25	83.2	22.3	87.3	22.7	86.8	20.7	78.9
15042	Km. 46+930 Gran Canal	22.7	80.5	22.1	78.4	20	78.3	20.4	78.6	18.6	76
15044	La Grande (Texcoco)	27.8	84	26.7	82.1	24.7	86.8	25.2	85.8	22.9	77.9
15047	Las Arboledas (R. Tuipán)	32.7	86.7	32.4	84.7	28.2	81.2	28.9	83.4	26.3	81.7
15050	Los Reyes, La Paz	27.6	77.7	27	75.5	24.3	78.8	24.6	78.4	22.7	71.4
15057	Mimiapan, Xonacatlán	71.1	100	68.6	100	64.8	100	65.7	100	60.1	100
15058	Molinito (San Bartolo)	48.6	98.2	47.5	97.8	38.8	89.1	40.3	92.7	38.9	92.1
15059	Molino Blanco, Naucalpan	42	95.1	40.4	94.9	36.9	90.1	37.8	93.6	34.4	91
15071	Presa el Tigre, San B.M.	43.6	100	42.7	100	37.9	100	38.7	100	35.3	100
15073	Psa. Guadalupe, Tultitlán	30.2	92.3	28.6	90.6	26.6	96.6	27.2	95.8	24.7	87.1
15074	Presa la Concepción	31.1	92.9	30.3	91.3	27.6	98.7	28.1	96.9	25.6	88.1
15077	Presa Totolica, Naucalpan	54	100	51.9	100	44.6	98	45.7	100	43.8	100
15081	Presa Aleman A. Tepotzotlán	28.1	92.1	27.6	90.4	24.2	91.7	24.7	91.2	22.5	82.9
15083	San Andrés, Texcoco	25.6	73.7	24.4	71.3	22.8	75.6	23.2	74.3	21.1	67.5

Clave	Nombre de la Estación	FRIJOL		HABA		MAIZ		PAPA		TRIGO	
		70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
15090	San Jeronimo Xonacahuacan	22.8	78.1	22.1	75.9	19.7	79.4	20.1	78.3	18.3	71.2
15092	San Juan Ixhuatepec	26.9	85.2	26.8	83.2	23.5	85.1	24.1	85.7	21.9	78
15094	San Luis Ameca	40.5	97.3	39.4	95.8	36	99.2	36.8	98.9	33.5	90.1
15095	San Luis Ayucan	72.9	100	70.4	100	59.9	100	62.7	100	61.8	100
15101	S. M. Tlaixpan, Texcoco	28.9	81.9	28.3	79.8	25.7	79.3	26.1	79.2	23.7	76.5
15103	San Pedro Nexapa, Amecameca	54.5	100	52.4	100	48.2	100	49.4	100	45.1	100
15106	San Rafael, Tlalmanalco	73.6	100	71.1	100	66.8	100	68	100	62.1	100
15114	Santiago Tlazala	78.2	100	76	100	65.9	100	68.1	100	66.5	100
15115	Santo Tomas Teoloyucan	23.5	75.6	22.8	73.3	20.7	75.2	21.1	73.8	19.2	71.6
15124	Tepexpan, Tepexpan	26.4	82.7	26.3	80.7	23.4	84.4	23.9	83.4	21.7	75.8
15127	Totolica (S. Bartolo), N.	43	95.9	42	95.4	36.4	88.8	37.8	91.4	34.7	90.5
15129	Tultepec, Tultepec	19.6	86	19.5	84.1	16.8	85	17.3	85.6	15.7	78
15167	El Tejocote (Texcoco)	28.7	80.9	28.5	78.8	25.2	81.9	25.8	80.9	23.5	73.6
15170	Chapingo, Texcoco	32.5	83.6	31.3	81.5	28.7	84.4	29.4	83.5	26.7	76.1
15231	Psa. Iturbide, Otzolotepec	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
15251	Atlacomulco (Prepa)	33	100	33.7	100	28.4	100	28.9	100	26.4	98.5
9002	Ajusco, Tlalpan	84.1	100	83.8	100	76.9	100	78.2	100	72.2	100
9003	Aguiles Serdan 46 (Azca)	36.9	89.9	35	81.4	32.2	86.6	33	88	30.1	85.8
9007	Cinzel 42 (Col. Sevilla)	24	83.1	23.3	81.1	21	82.6	21.4	83.5	19.5	76
9009	Col. Agricola Oriental	21.3	73.9	21	71.6	18.3	72.5	18.8	72.7	17.2	66.3
9012	Col. Escandon	40.2	100	37.7	100	35.1	100	36	100	32.8	96.8
9013	Col. Moctezuma (SMN)	26	84	25.7	82.1	22.5	83.2	23.1	83.7	21.1	76.3
9014	Col. Santa Ursula Coapa	41.9	100	41	100	36.2	100	37.1	100	33.9	100
9019	Desierto de los Leones	95	100	94.1	100	90.9	100	92.1	100	84.4	100
9020	Desv. Alta al Pedregal	61.8	100	59.2	100	53.8	100	55.1	100	50.3	100
9021	Egipto 7 (Azcapotzalco)	36.6	87.9	34.9	86.1	31.9	86.3	31.9	87.9	29.8	84.7
9022	Km. 39.5 a Cuernavaca	94	100	92.4	100	85.3	100	86.7	100	79.4	100
9025	Hda. La Patera G.A. Madero	26.1	76.2	25	73.9	22.5	69.6	23.1	71	21.1	69.7
9026	Morelos 77 (Ixtapalapa)	27.1	78.3	26	76.1	24	80.8	24.4	80.4	22.3	73.1
9029	Km. 6+250 Gran Canal	25.4	77.8	24.6	75.5	22.3	79.1	22.8	79.1	20.8	72.1
9030	La Venta Cuajimalpa (SMN)	79.8	100	77.6	100	73.7	100	74.6	100	68.1	100

Clave	Nombre de la Estación	FRIJOL		HABA		MAIZ		PAPA		TRIGO	
		70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%	70%	20%
9032	Milpa Alta, Milpa Alta	37.9	96.3	37.2	94.8	33	93.3	33.5	94.3	30.6	85.9
9034	Moyoguarda (Xochimilco)	36.8	91.1	34.8	89.3	32.1	94.5	32.7	94	29.8	85.5
9037	Presa Ansaldo, Contreras	56.9	100	54.5	100	50.3	100	51.1	100	46.6	100
9038	Presa Mixcoac, Mixcoac	60.3	100	57.6	100	53.2	100	54.4	100	49.6	100
9039	Presa Tacubaya, Tacubaya	47.5	100	44.4	100	42.7	100	43.6	100	39.7	100
9041	San Fco. Tlalne (Xochi)	59	100	57.5	100	51.2	100	52.7	100	48.1	100
9042	San Gregorio Atlap. Xoch	34.3	99.8	33.9	98.5	30.9	100	31.5	100	28.6	92.8
9043	Col. San Juan de Aragon	26.4	75.3	25.7	72.9	23.4	76.7	23.8	76.3	21.7	69.5
9047	Col. Tacuba, Tacuba	30.1	86.1	28.7	84.2	26.8	83.7	27.5	85.5	25.1	82.3
9049	Tarango (Villa Obregon)	41.3	100	39.7	100	35.7	100	36.6	100	33.3	100
13001	Acayuca, Zapotlan de J.	8.8	74.3	9	72.9	7.3	70.9	7.6	71	6.9	64.8
13002	Apan, Apan (DGE)	22.2	84.3	22	82.3	19.4	82.3	19.9	81.9	18.2	74.5
13006	Ciudad Sahagun	18.8	73.2	18.5	72.1	16.3	70.2	16.8	70.2	15.3	63.9
13008	El Manantial, Tizayuca	17.3	70	16.4	67.5	15	68.9	15.3	69.1	13.9	63.6
13017	Mineral del Chico	69.2	100	66.6	100	66.9	100	66.9	100	61	100
13027	San Jeronimo Tepeapulco	25	100	23.9	100	21.2	92.2	21.8	94.2	19.9	88.6
13029	San Lorenzo Zayula	13.6	87.6	12.6	85.7	13.3	93.5	13.3	91.8	12.1	83.6
13033	Singuilucan, Singuilucan	16.8	74.9	16.1	72.6	15.3	72.7	15.6	73.4	14.3	71
13035	Tezontepec, Tezontepec	12.8	64.5	12.9	62.3	11.1	63.5	11.4	63.1	89.6	57.3
13037	Tlanalapan, Tlanalapan	15.4	70.9	15.2	69	13.2	62.7	13.6	63.5	12.3	62.2
13039	Tolcayuca, Tolcayuca	13.3	100	13.2	100	11.3	100	11.6	100	10.6	100
13043	Zempoala, Zempoala	13.7	69.2	13.8	67	11.7	60.8	12	61.7	10.9	60.6
13047	Tezontepec, Tezontepec	15.4	68.5	15.3	66.2	13.2	66.7	13.6	66.7	12.4	60.6
13079	Presa el Giron, Epazoyuca	8.4	55.2	8.1	52.2	7.5	52.5	7.7	53.2	7	48.8
13085	Presa Tezoyo, Almoloya	16.1	82.9	15.6	81	14.6	82	14.8	81.8	13.5	79
13089	Tepeji, Tepeji del Rio	20.2	78.2	19.8	76.1	17.3	74.4	17.7	74.7	16.1	72.3
13116	El Sembo, Huasca Ocampo	26.7	100	24.6	100	27.4	100	27.6	100	25.1	100

En la Figura 33A del anexo el ISNH para Frijol a 70% se observa que la mayor parte de la región de la cuenca de México presenta problemas de adaptación para este cultivo, cerca del 90% del área de estudio no es apta para su establecimiento, salvo en la región suroeste que presenta condiciones regulares para el Frijol y una pequeña zona que tiene la característica de excelente esto dentro de las categorías en que se clasifica al Índice de satisfacción de necesidades hídricas. Al 20% (Figura 34A) la zona suroeste presenta la categoría de excelente para el establecimiento de Frijol, la mayor parte de la cuenca presenta condiciones buenas. Cuando disminuye el nivel de probabilidad aumentan las estaciones que son buenas. En general las zonas consideradas como buenas para el establecimiento de Frijol se ubican en el suroeste de la cuenca de México.

En el caso del Haba el ISNH para una probabilidad de 70% (Figura 35A) nos muestra que la mayor parte de la cuenca presenta una categoría de mala; regular y buena solo en un pequeña parte de la zona suroeste aproximadamente el 10% del área de estudio; no presenta ninguna zona con categoría de excelente. En la Figura 36A para Haba al 20% de probabilidad presenta en la mayor parte de la cuenca condiciones buenas para el establecimiento del cultivo, la zona suroeste es excelente para el cultivo de Frijol y observando el mapa de excesos al 20% de probabilidad podemos decir que estos no son muy significativos. La zona suroeste manifiesta potencial para la adaptación climatológica del cultivo de Haba en base al índice de satisfacción de necesidades hídricas.

En la Figura 37A del anexo se muestra el ISNH para el Maíz a 70% de probabilidad, podemos ver que la mayor parte de la cuenca es considerada como mala y solo una parte de la zona suroeste recibe la categoría de regular a buena. El ISNH para el maíz a 20% de probabilidad (Figura 38A) considera la mayor parte de la región como buena para el establecimiento del Maíz, la zona suroeste presenta condiciones excelentes para el establecimiento del mismo; sin embargo es importante revisar el Balance Hídrico del cultivo a este nivel de probabilidad para poder saber la cantidad de excesos que presenta y concluir si es recomendable o no la introducción del mismo. Podemos decir entonces

que la zona suroeste manifiesta potencial para la adaptación climatológica del cultivo de maíz en base al índice de satisfacción de las necesidades hídricas.

En la Figura 39A del anexo se representa el ISNH para una probabilidad del 70% para Papa, se observa que solo una pequeña parte se consideran como regular y una parte aun más pequeña como buena, la mayor parte de la región se considera mala para este cultivo. El ISNH para una probabilidad del 20% para Papa se representa en la Figura 40A de anexo, donde se observa que la mayor parte de la región se clasifica de buena a regular, y la humedad es suficiente para el desarrollo del cultivo, aunque si fuera necesario habría que recurrir a riegos de auxilio; solo una pequeña parte de la zona suroeste de la región es considerada como excelente. El cultivo de Papa se adapta bien a la zona suroeste, en esta zona el cultivo satisface su necesidad hídrica.

En la Figura 41A de anexo se muestra el ISNH para Trigo al 70% de probabilidad, en ella se observa que toda la región es mala para el establecimiento del trigo, salvo una muy pequeña zona que es considerada como regular, al 70% de probabilidad de lluvia no presenta en ningún área con la categoría de excelente para su introducción. El ISNH para Trigo al 20% de probabilidad se representa en la Figura 42A del anexo, nos muestra que la mayor parte de la cuenca se clasifica como buena y regular para el establecimiento del trigo, la región suroeste se encuentra en la categoría de excelente, aunque es importante revisar el balance hídrico del cultivo a este nivel de probabilidad para poder saber la cantidad de excesos que presenta y decir si es recomendable el establecimiento del mismo. En general el trigo reduce su zona de adaptación comparada con los otros cultivos de estudio.

## 7 CONCLUSIONES

Es posible mediante la zonificación agroclimática establecer las zonas de mayor aptitud para el desarrollo de frijol, haba, maíz, papa y trigo en la cuenca de México.

El cultivo de Frijol cuenta con mayor potencial para su introducción en la región de estudio, ya que la mayor parte del área se considera como buena y excelente de acuerdo al índice de satisfacción de necesidades hídricas.

El trigo es el cultivo que tiene menos adaptación a la región de estudio, en ninguna parte de la cuenca se clasifica como excelente de acuerdo al índice de satisfacción de necesidades hídricas.

De acuerdo con el Balance hídrico las deficiencias de humedad se localizan en la zona centro y norte de la cuenca, los excesos de humedad en una pequeña región de la zona suroeste.

En términos generales todos los cultivos estudiados pueden establecerse sin problemas en la región suroeste ya que esta zona tiene potencial para la adaptación climatológica de los cultivos con base en el índice de satisfacción de necesidades hídricas y los excesos que presentan son pocos y no son muy altos.

## **8 RECOMENDACIONES**

Se recomienda la siembra de los cultivos estudiados en las zonas consideradas como buenas bajo la aplicación de riegos en etapas críticas del cultivo, esto con la finalidad de alcanzar un óptimo desarrollo y una buena producción de frutos.

Para poder realizar agricultura en las zonas con baja precipitación, es necesaria la aplicación del algún tipo de riego además de realizar un estudio económico sobre la rentabilidad del cultivo en esa zona.

## 9 LITERATURA CITADA

Aguilera, C. M, y Martínez, E. R. 1996. Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.

Ángeles, M. V. 2000. Diseño agronómico de sistemas de riego presurizado. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.

Arteaga, R. R. y Vázquez, P. M. A. 2001. Componentes del Balance Hídrico y metodologías para su cálculo. En: Curso Internacional de Ingeniería de Drenaje Agrícola III. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.

Baldion, R. J. V. 1985. Conceptos básicos y Métodos de cálculo del Balance Hídrico. Instituto Colombiano de Hidrología y Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT). Bogota. D. E. Colombia.

Bárceñas, A. P. 2002. Determinación de zonas potenciales para el establecimiento de plantaciones de pitahaya (*Hylocereus spp.*). Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Programa en Hidrociencias. Motecillos, México.

Chang, J. 1968. Climate and agriculture and Ecological survey. Aldine publishion Co, Chicago, Illinois. USA.

Crespo, P. G. 2012. Programa MdCli Versión 1.0.0.4. Manejador de datos climáticos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. 1976. Las necesidades de agua de los cultivos, Estudios FAO, riego y drenaje Boletín N° 24. Roma, Italia.

Doorenbos, J. y Kassam, A.H. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Riego y drenaje. Boletín N° 33. FAO. Roma, Italia.

FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Riego y Drenaje. Boletín N° 56. Roma, Italia.

FAO. 1997. Zonificación agro-ecológica: guía general. Boletín de suelos N° 73. FAO. Roma, Italia.

Frére M. y Popov G. 1986. FAO Pronóstico Agrometeorológico del rendimiento de los cultivos. Boletín N° 73 de estudio FAO producción y protección vegetal. Roma, Italia.

Grassi, C. J. 1968. Estimación de los usos consuntivos de agua y requerimientos de riego con fines de formulación y diseño de proyectos. Criterios y procedimientos. CIDIAT. Mérida, Venezuela.

INEGI. 2003. Información nacional sobre Perfiles de suelo versión 1.2 (disco compacto). México.

Instituto nacional de investigaciones agrícolas (INIA). 1985. Diagrama de las principales especies vegetales con las cuales se efectúan investigaciones agrícolas en México. SARH-INIA. México

Jackson, I. J. 1977. Climate, water and agriculture in the tropics. Longman Group. New Cork, USA.

Martínez F. J. L. 1994. Zonificación agroecológica para los cultivos de naranjo (*Citrus sinensis* (L) Osbeck) y limón mexicano (*Citrus aurantifolia* (Christm) Swingle) en el estado de Oaxaca, México. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Muñoz, G. G. 2002. Zonificación agroclimática del Valle de Toluca. Tesis profesional. Departamento de Irrigación. Chapingo, México

Norero, A. 1976. Evaporación y Transpiración. Centro de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT). Mérida, Venezuela.

Palacios, V. E. 1980. Estimación de los requerimientos de agua de los cultivos para conocer cuándo y cuánto regar. Boletín Técnico Núm. 11. Departamento de Irrigación, UACH, Chapingo, México.

Penman, H.L. 1956. Vegetation and hydrology. Comunicación técnica N°53, Commonwealth Bureau of Soils.

Pizarro, C. F. 1990. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación. Segunda edición. Madrid, España.

Pruit, W. O. 1958. Irrigation table. Publicado en la revista Crops and Soils. USA.

Ramírez, M. J. A. 2007. Zonificación Agroclimática del estado de Morelos. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.

Rojas, O. E. 1985. Estudio Agroclimático de Costa Rica. Proyecto de agroclimatología. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica.

Romo, G. J. R. 1985. Zonas con potencial agroclimático para la producción de cinco oleaginosas bajo temporal en la república mexicana. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México.

Romo, G. J. R. y Arteaga, R. R. 1989. Meteorología Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. 2ª edición. Chapingo, México.

Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review. USA.

Thornthwaite, C. W. y Mather, J. R. 1966. El presupuesto hidráulico y su uso en los riesgos. En el libro Agua, su aprovechamiento en la agricultura. Segunda edición en español, traducido por J. Meza Nieto. Editorial Herrero. México, D. F.

Yescas, V. C. 2004. Zonificación Agroclimática de la Sierra Norte de Oaxaca. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.

## 10 ANEXOS

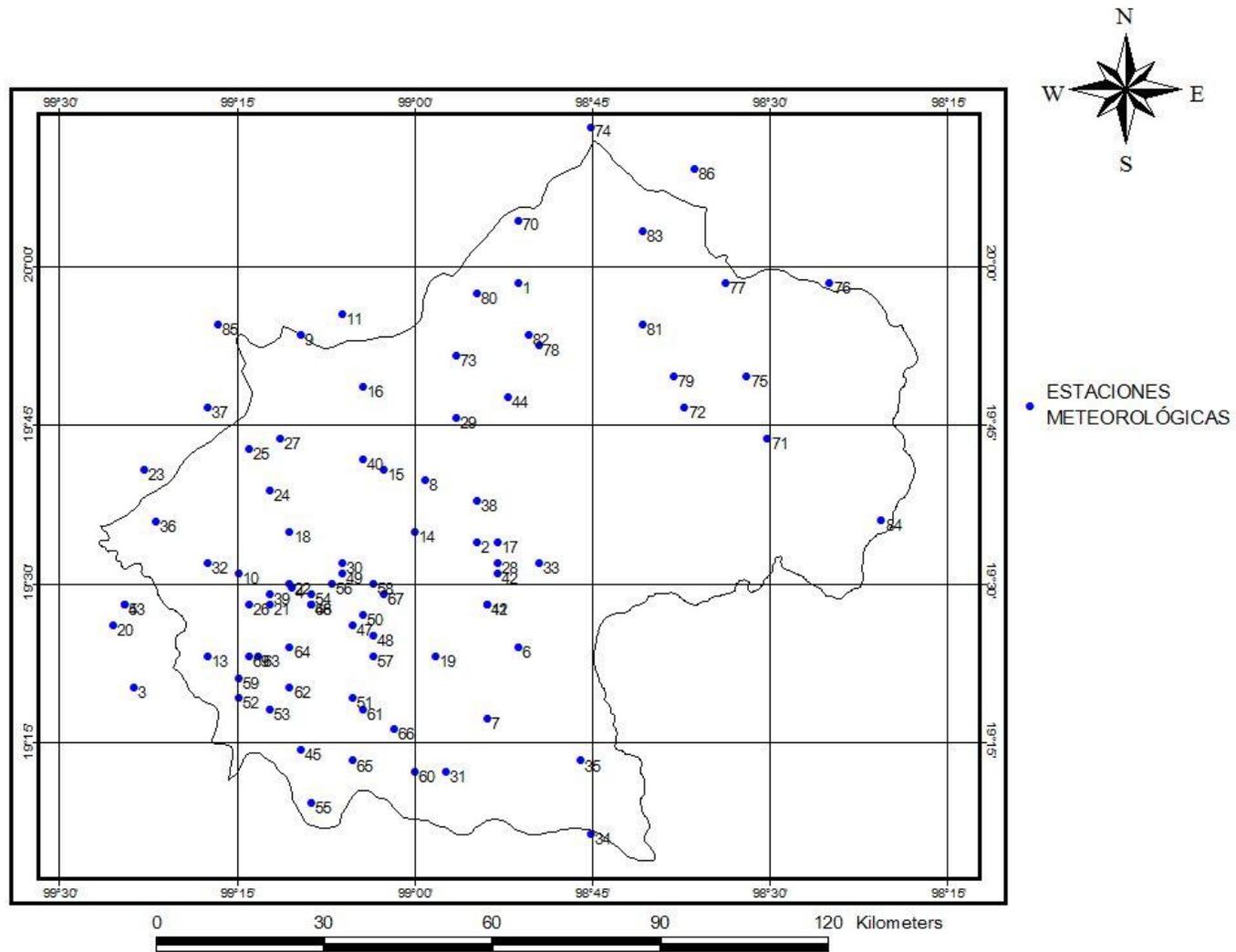


Figura 1A. Localización de las estaciones meteorológicas.

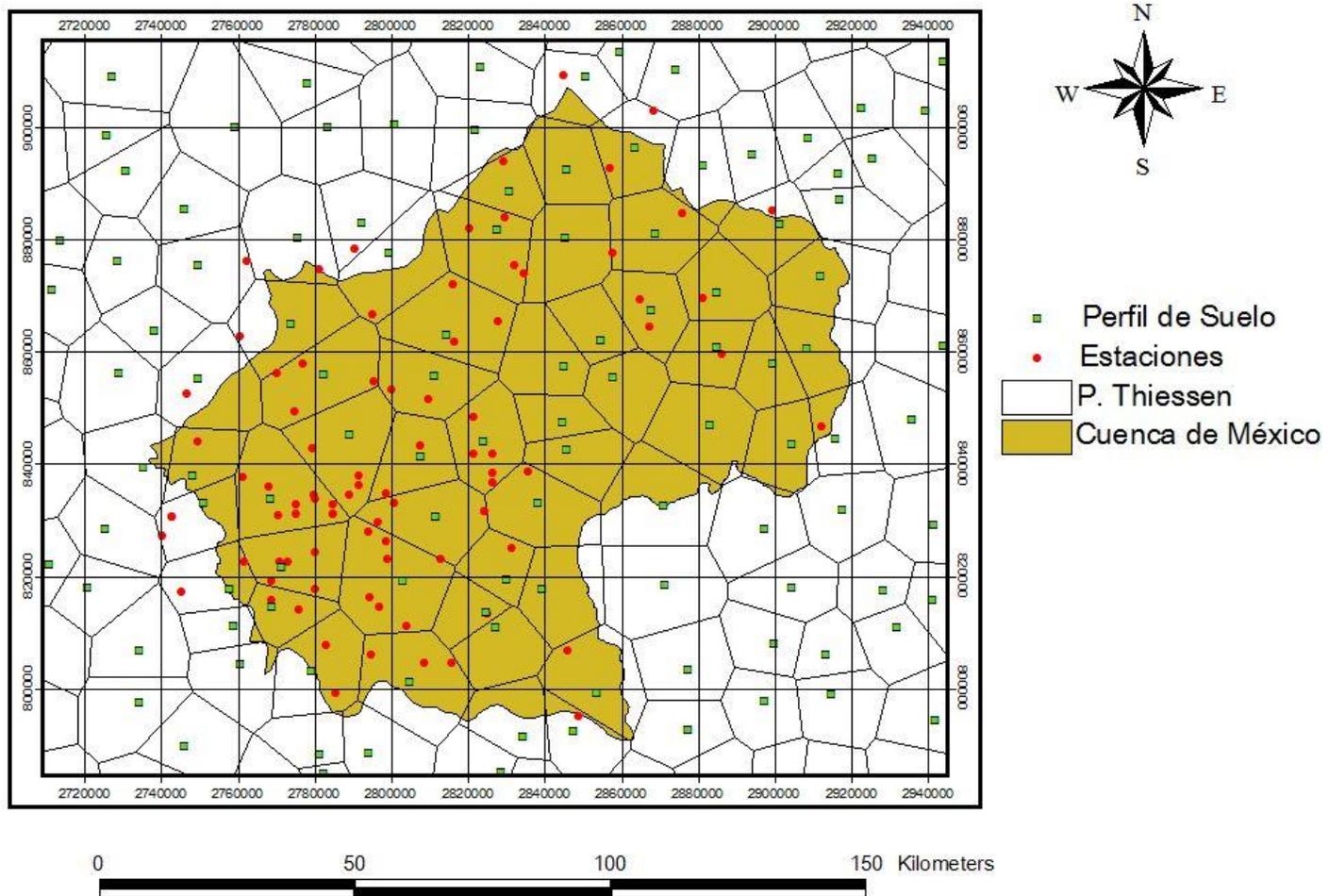


Figura 2A. Polígonos de Thiessen de los perfiles del Suelo.

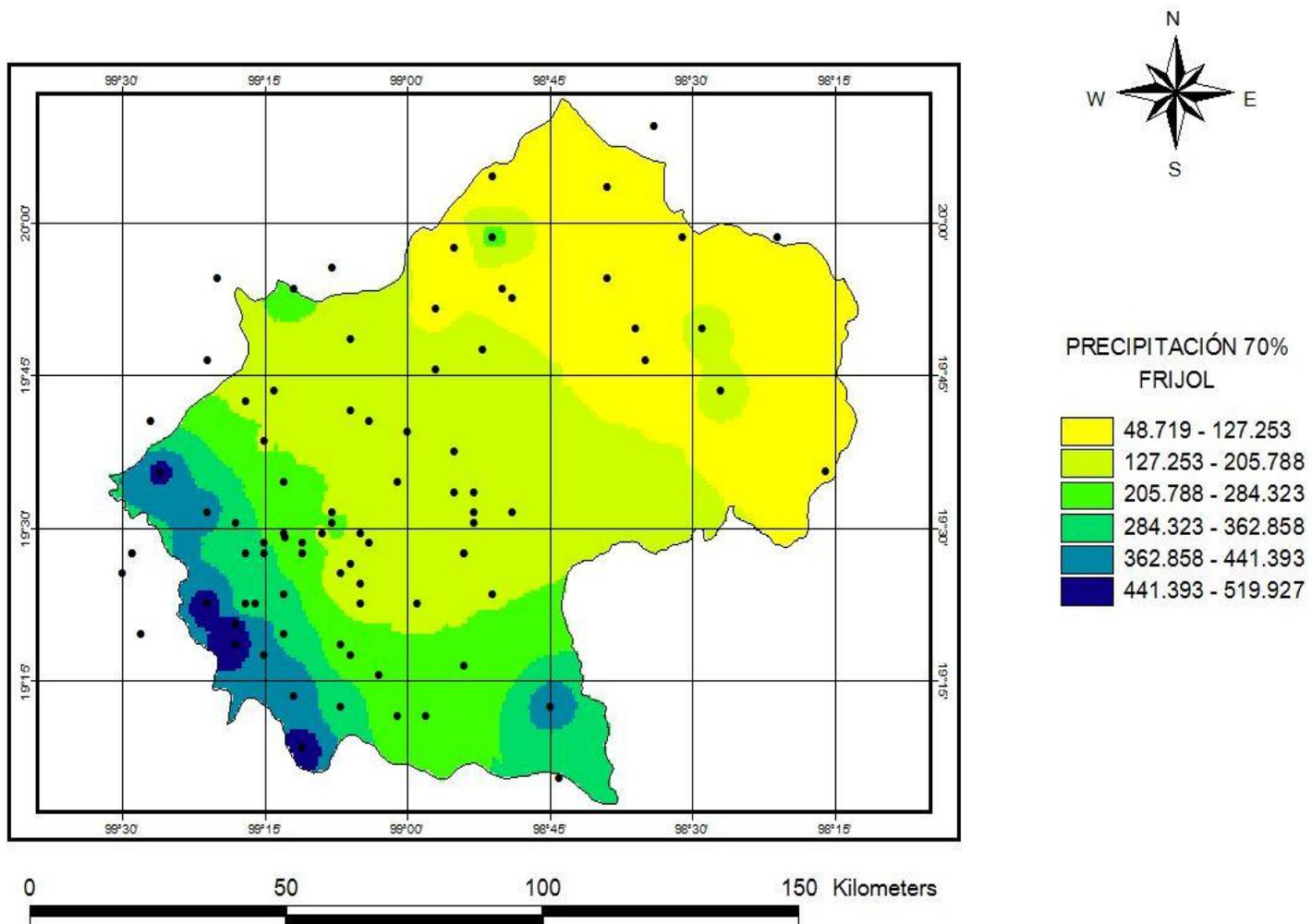


Figura 3A. Lluvia acumulada en la estación de crecimiento de Frijol para una probabilidad de 70%.

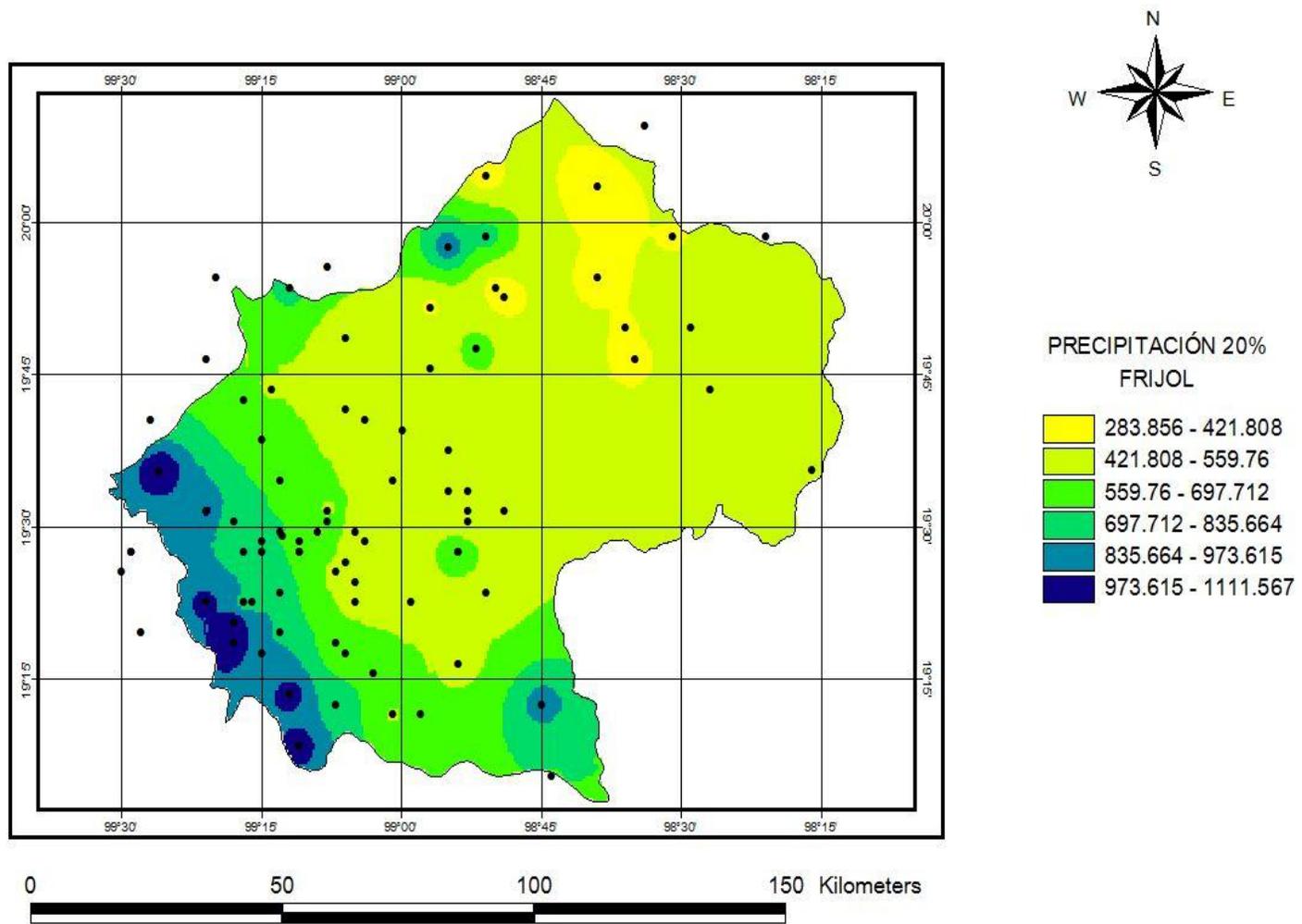


Figura 4A. Lluvia acumulada en la estación de crecimiento de Frijol para una probabilidad de 20%.

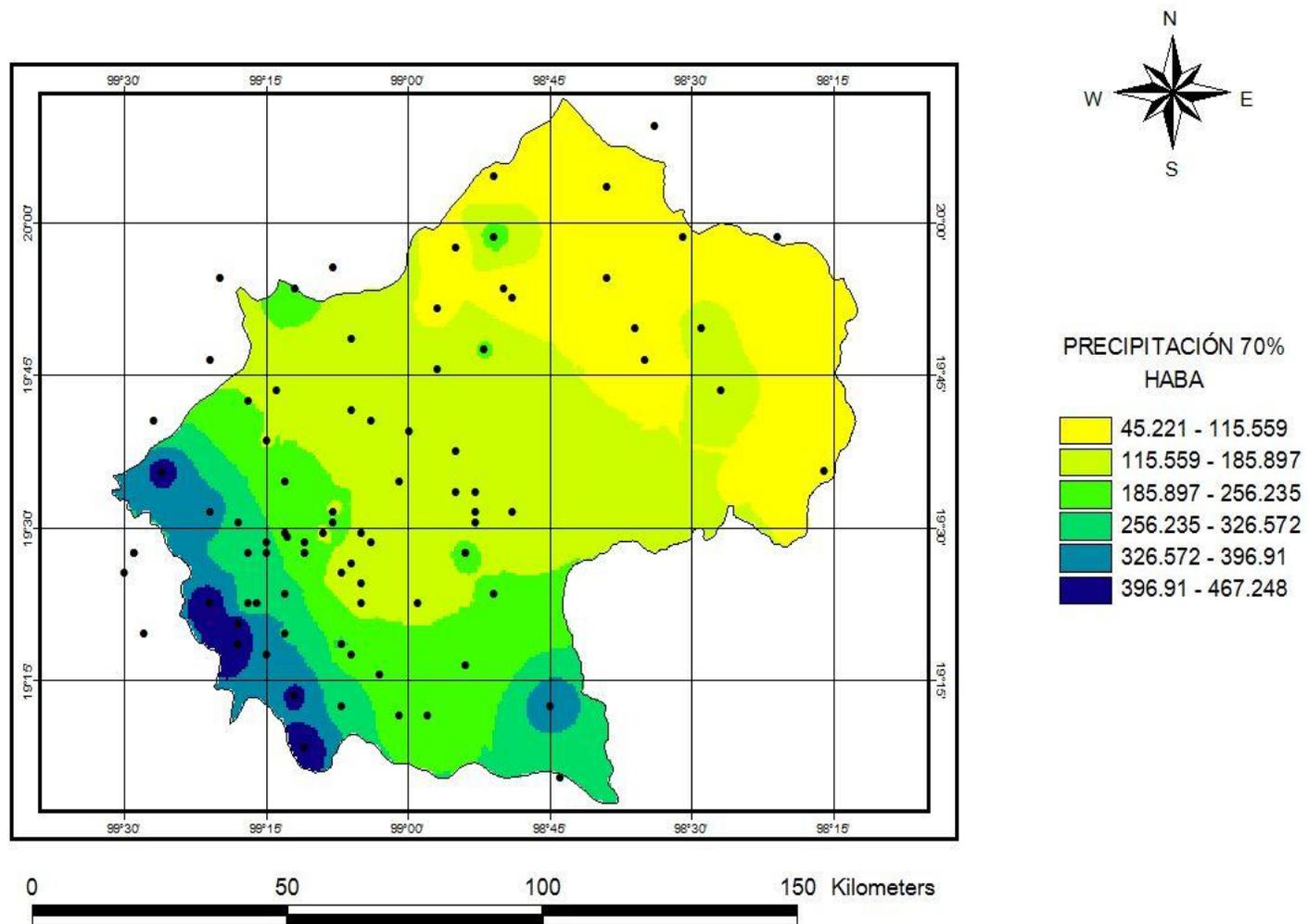


Figura 5A. Lluvia acumulada en la estacion de crecimiento de Haba para una probabilidad de 70%.

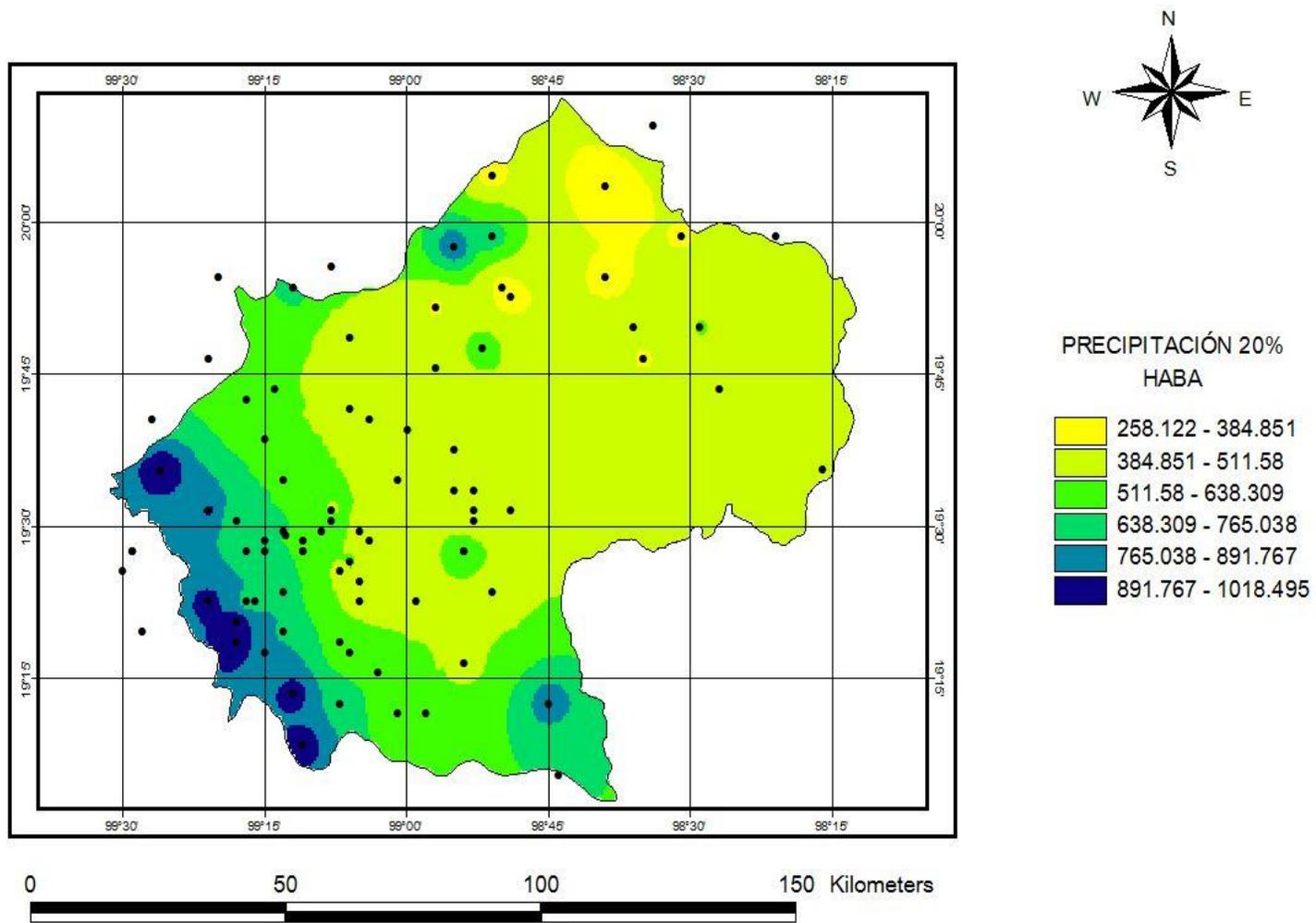


Figura 6A. Lluvia acumulada en la estación de crecimiento de Haba para una probabilidad de 20%.

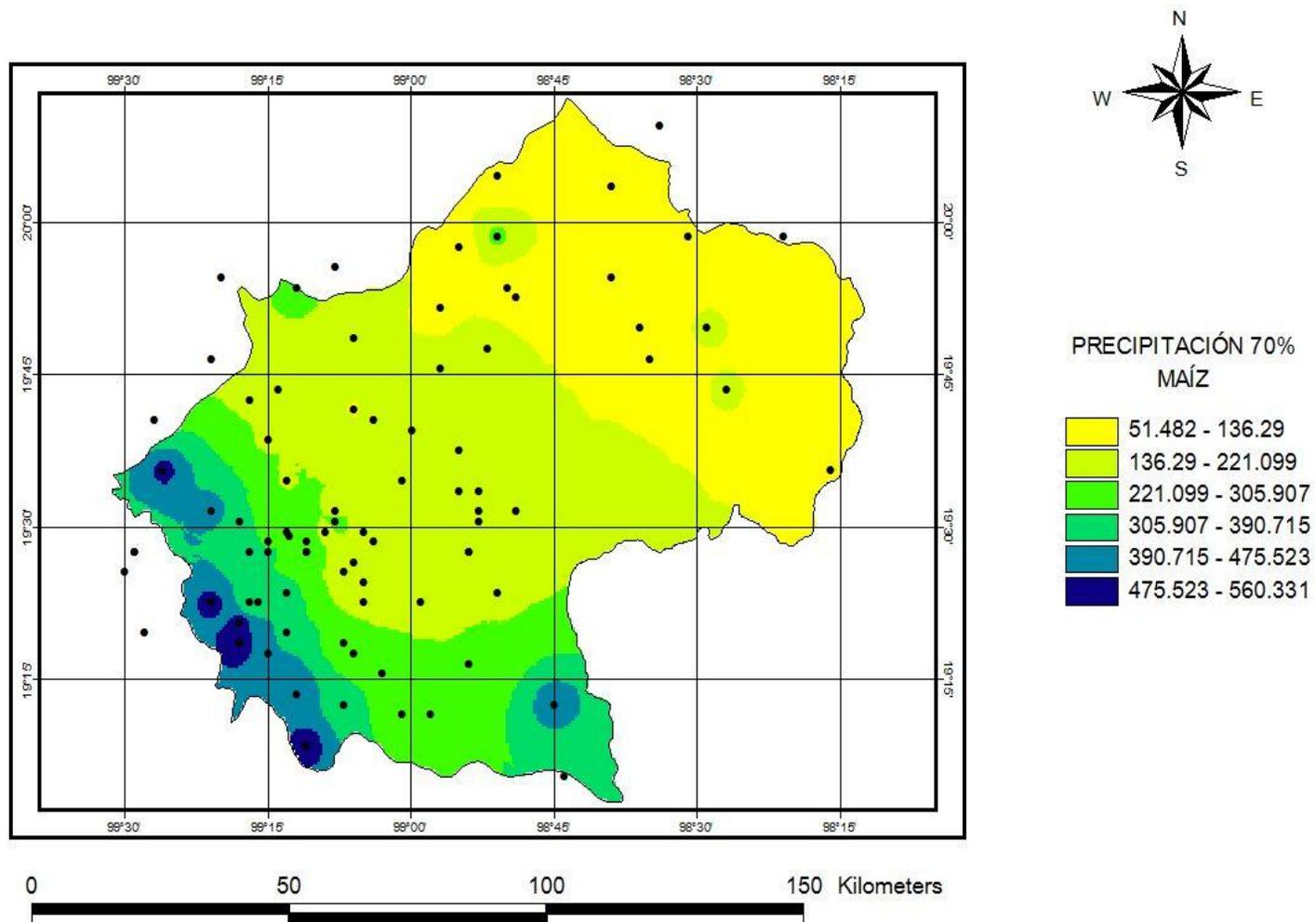


Figura 7A. Lluvia acumulada en la estación de crecimiento de Maíz para una probabilidad de 70%.

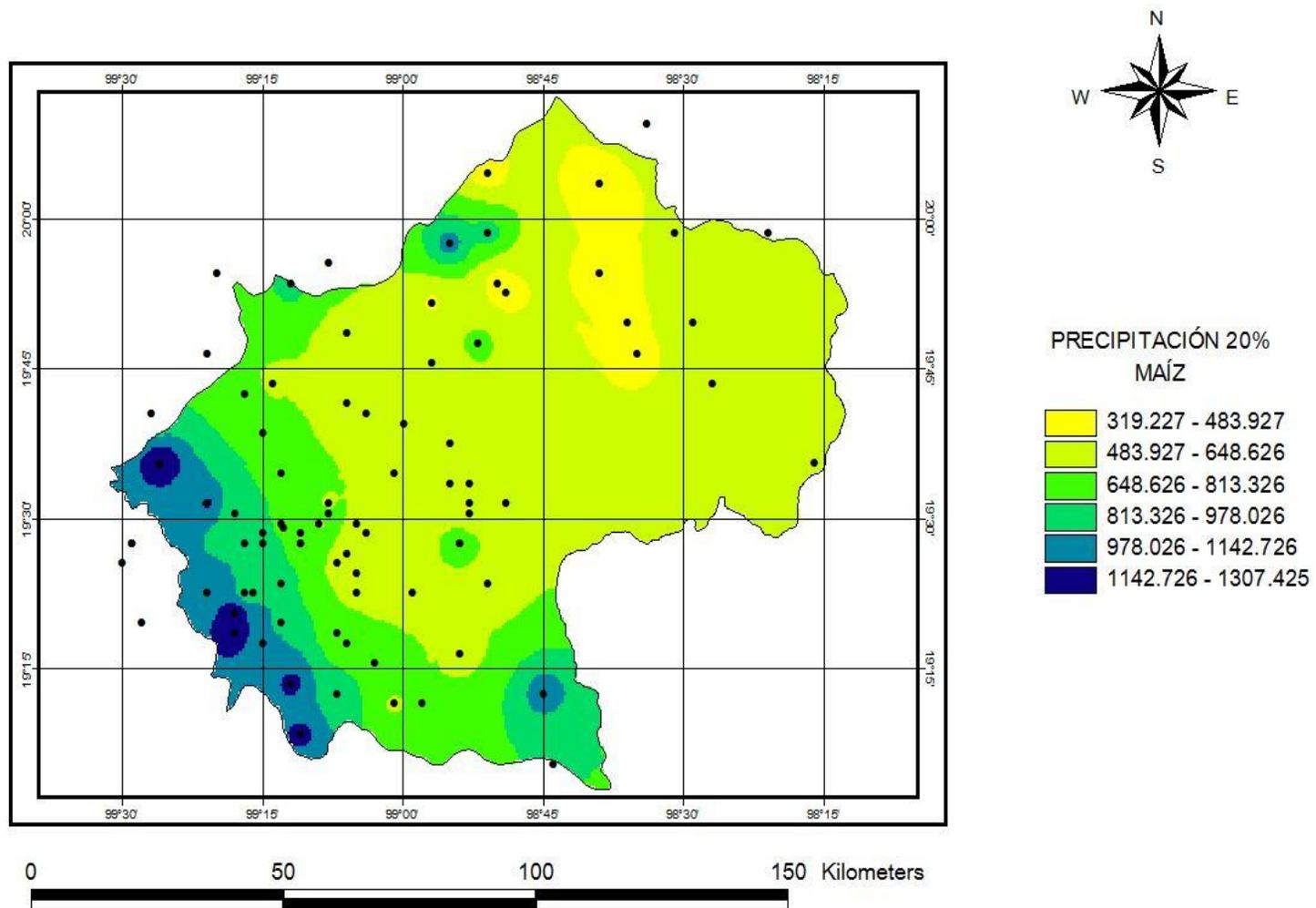


Figura 8A. Lluvia acumulada en la estación de crecimiento de Maíz para una probabilidad de 20%.

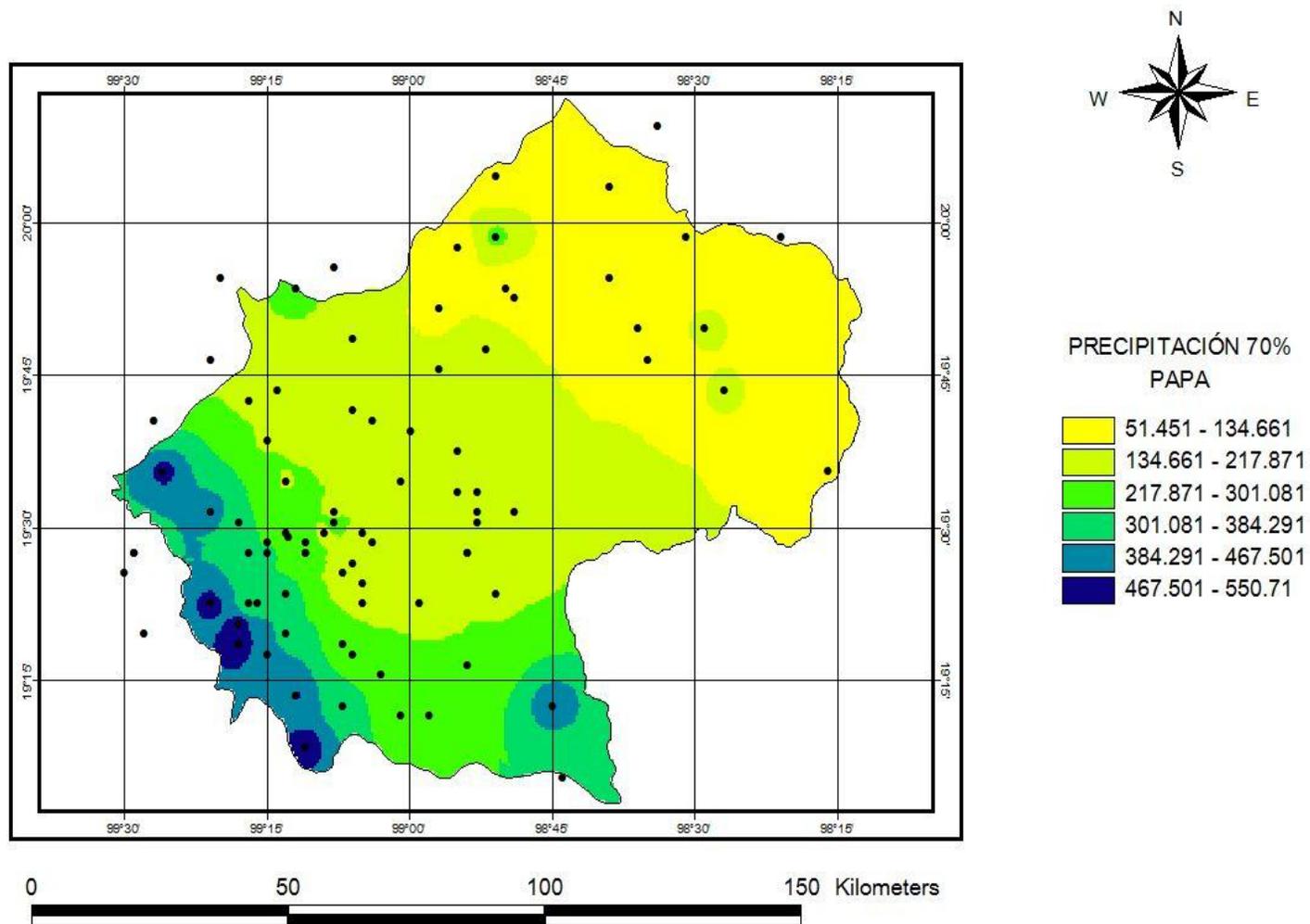


Figura 9A. Lluvia acumulada en la estación de crecimiento de Papa para una probabilidad de 70%.

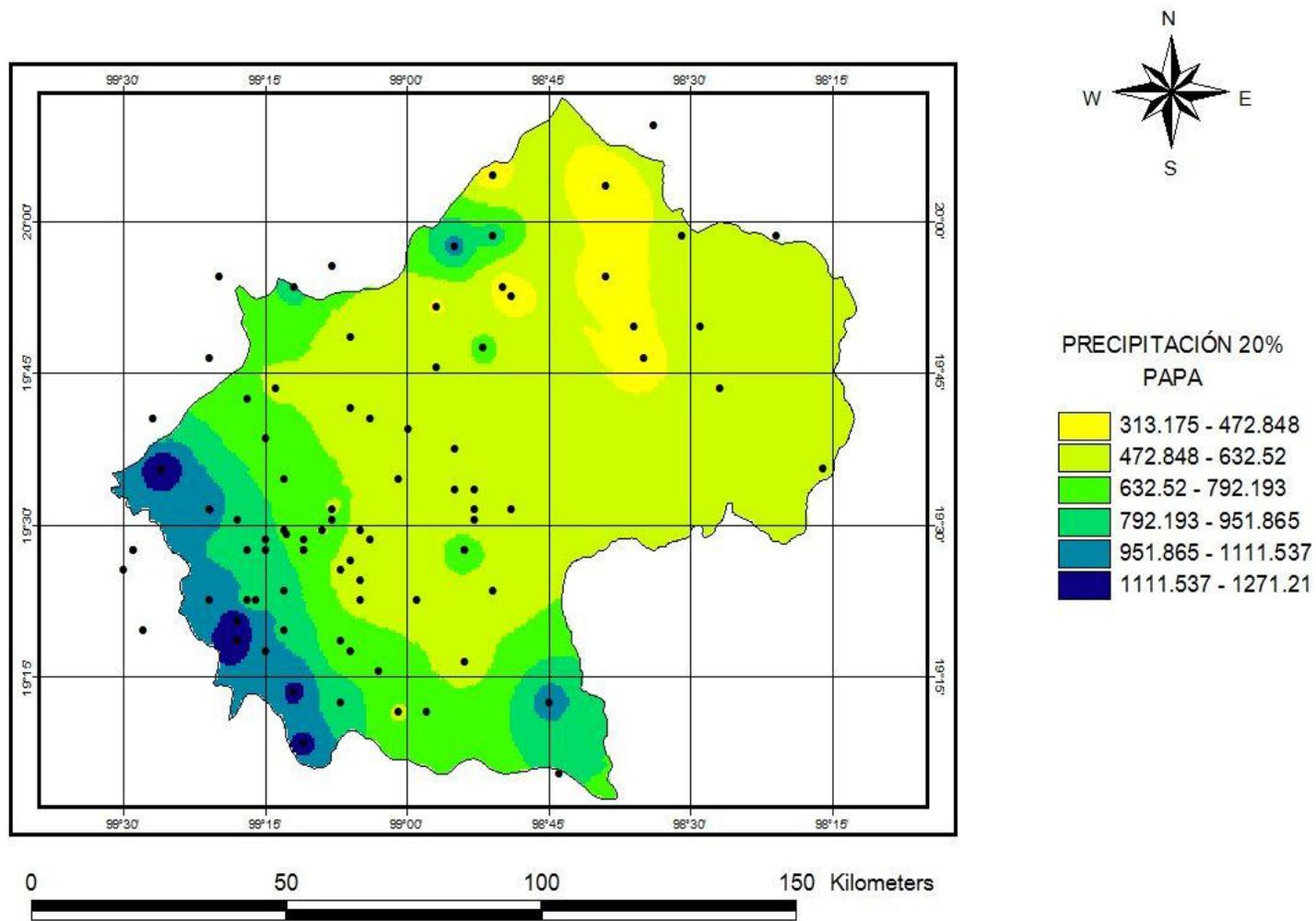


Figura 10A. Lluvia acumulada en la estación de crecimiento de Papa para una probabilidad de 20%.

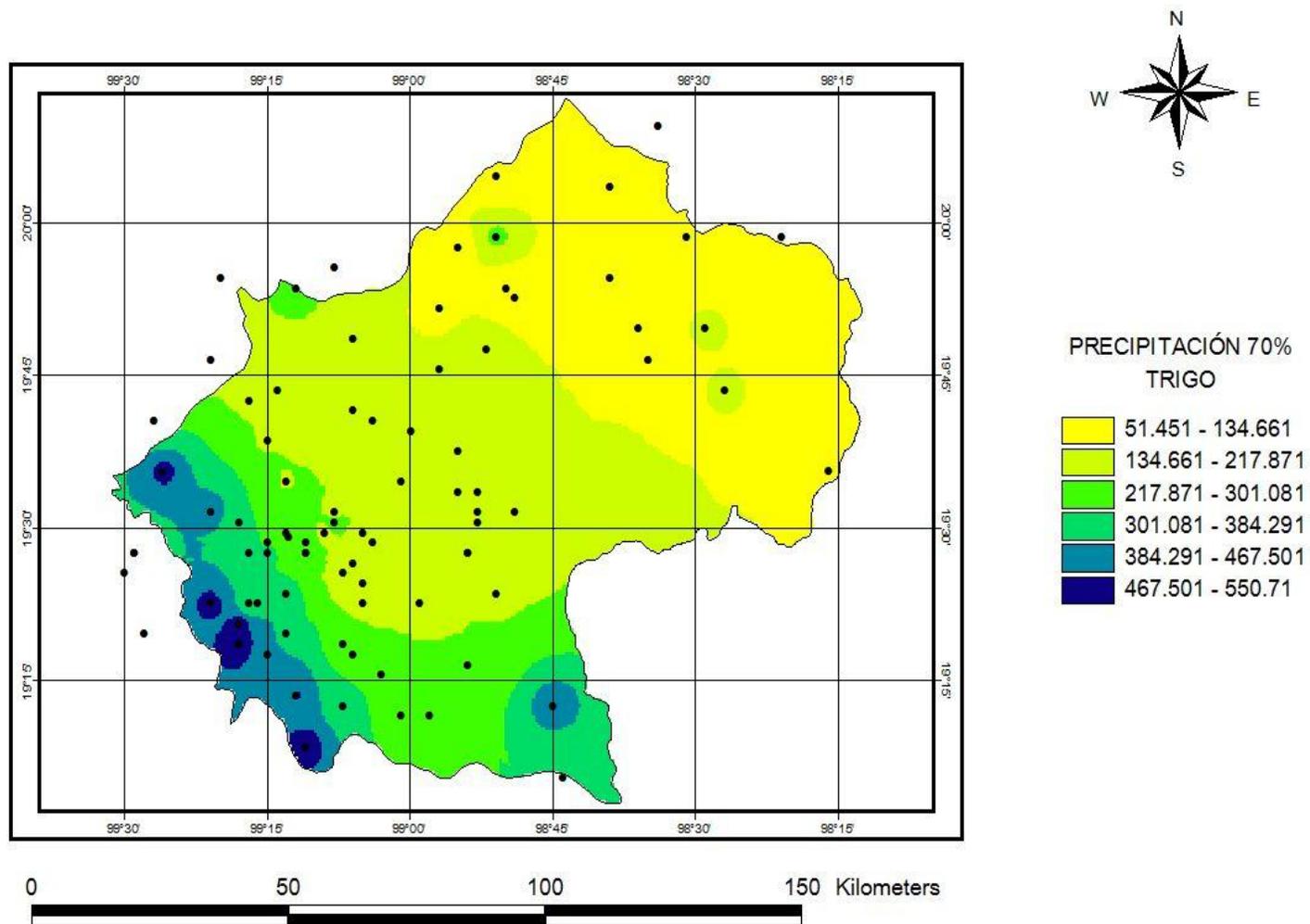


Figura 11A. Lluvia acumulada en la estación de crecimiento de Trigo para una probabilidad de 70%.

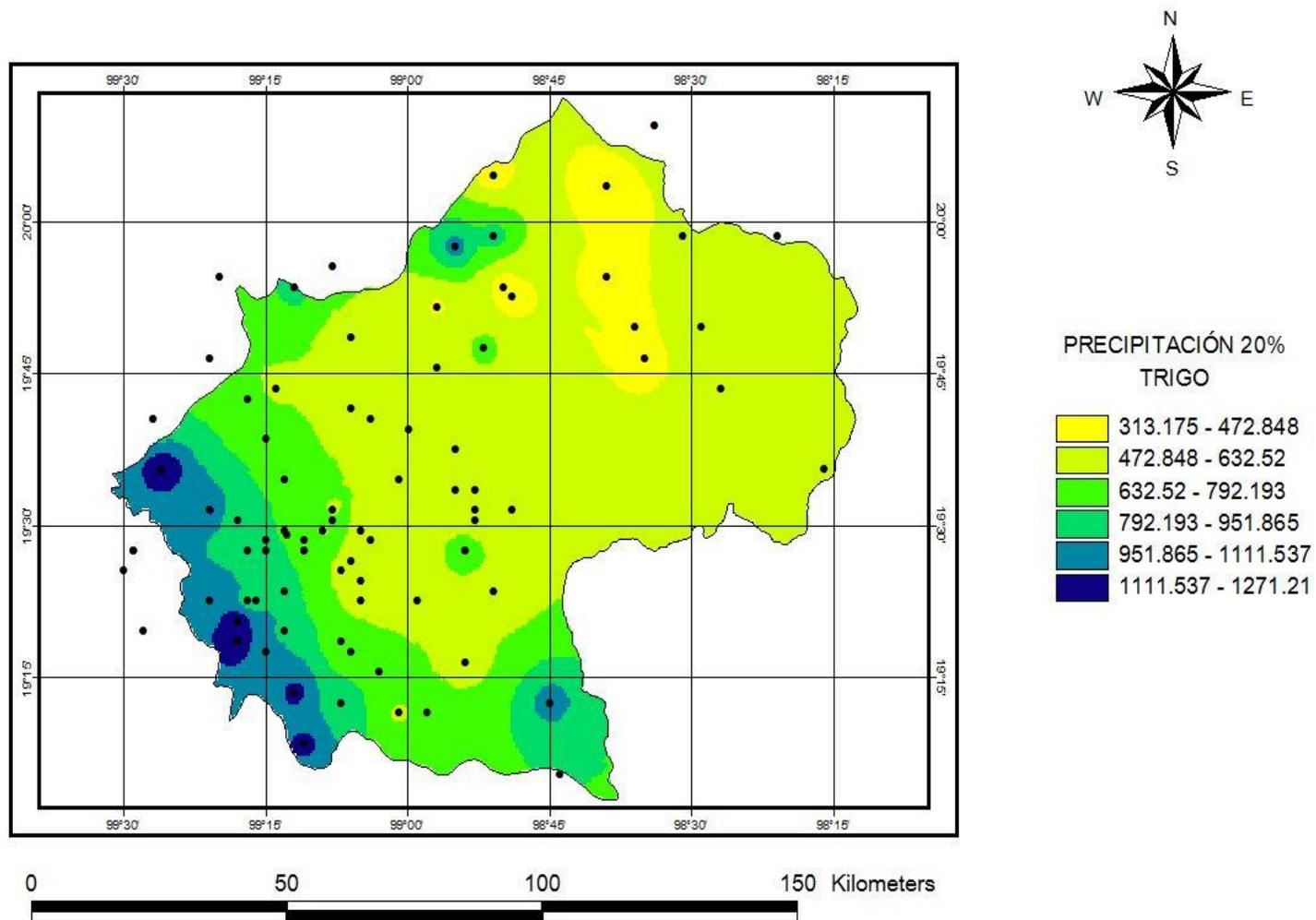


Figura 12A. Lluvia acumulada en la estación de crecimiento de Trigo para una probabilidad de 20%.

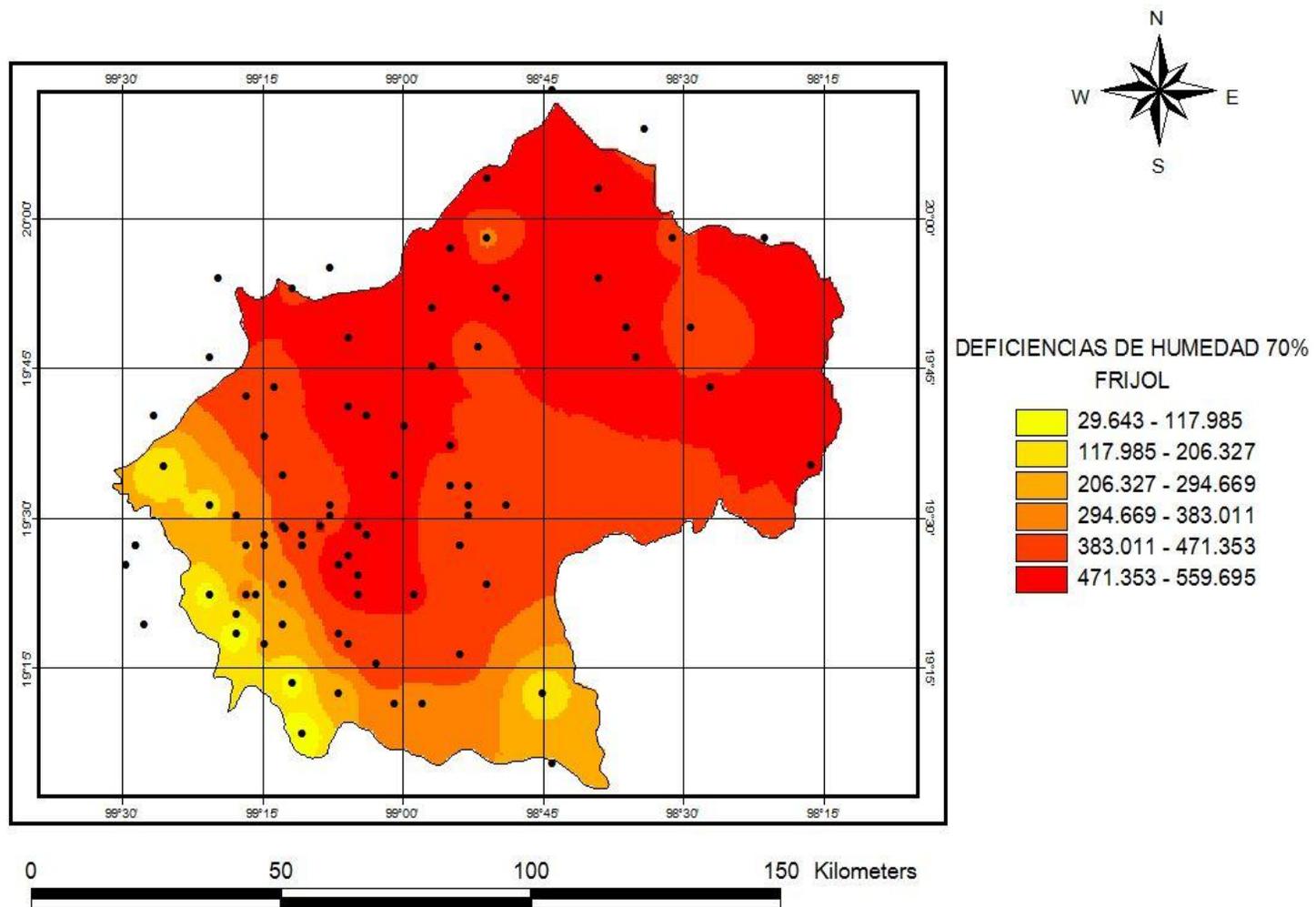


Figura 13A. Deficiencias de humedad durante la estacion de crecimiento de Frijol para una probabilidad de 70%.

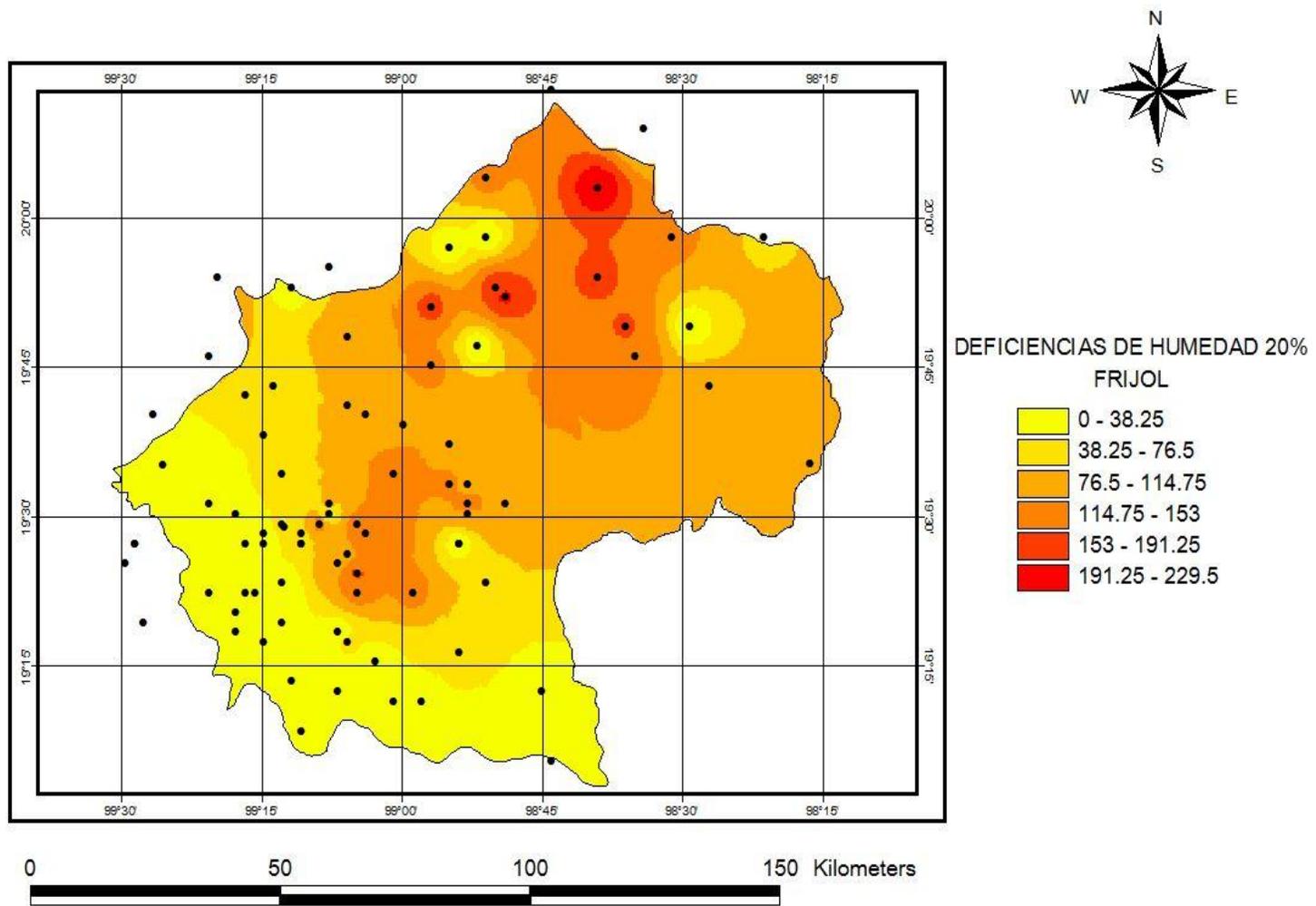


Figura 14A. Deficiencias de humedad durante la estacion de crecimiento de Frijol para una probabilidad de 20%.

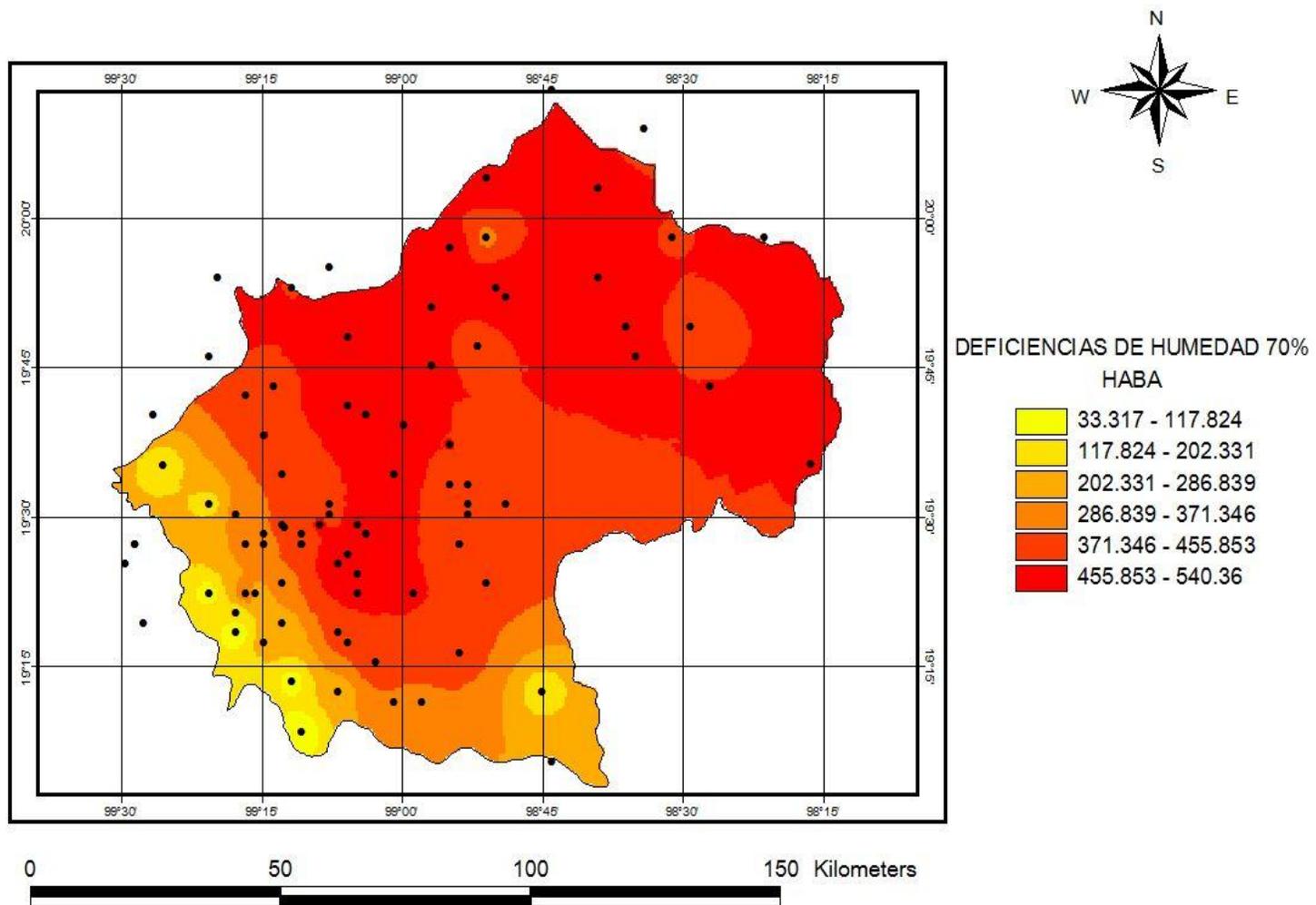


Figura 15A. Deficiencias de humedad durante la estacion de crecimiento de Haba para una probabilidad de 70%.

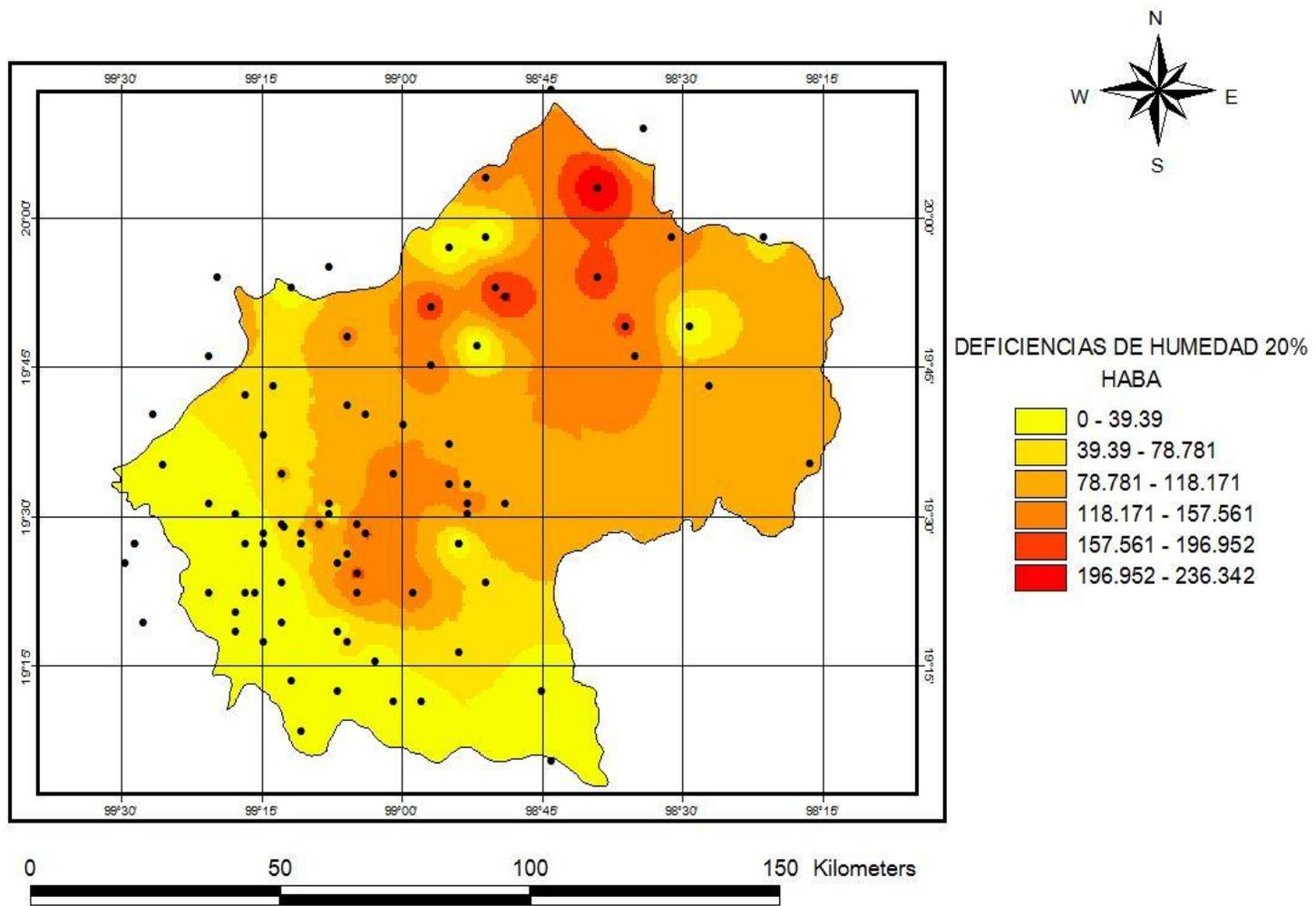


Figura 16A. Deficiencias de humedad durante la estacion de crecimiento de Haba para una probabilidad de 20%.

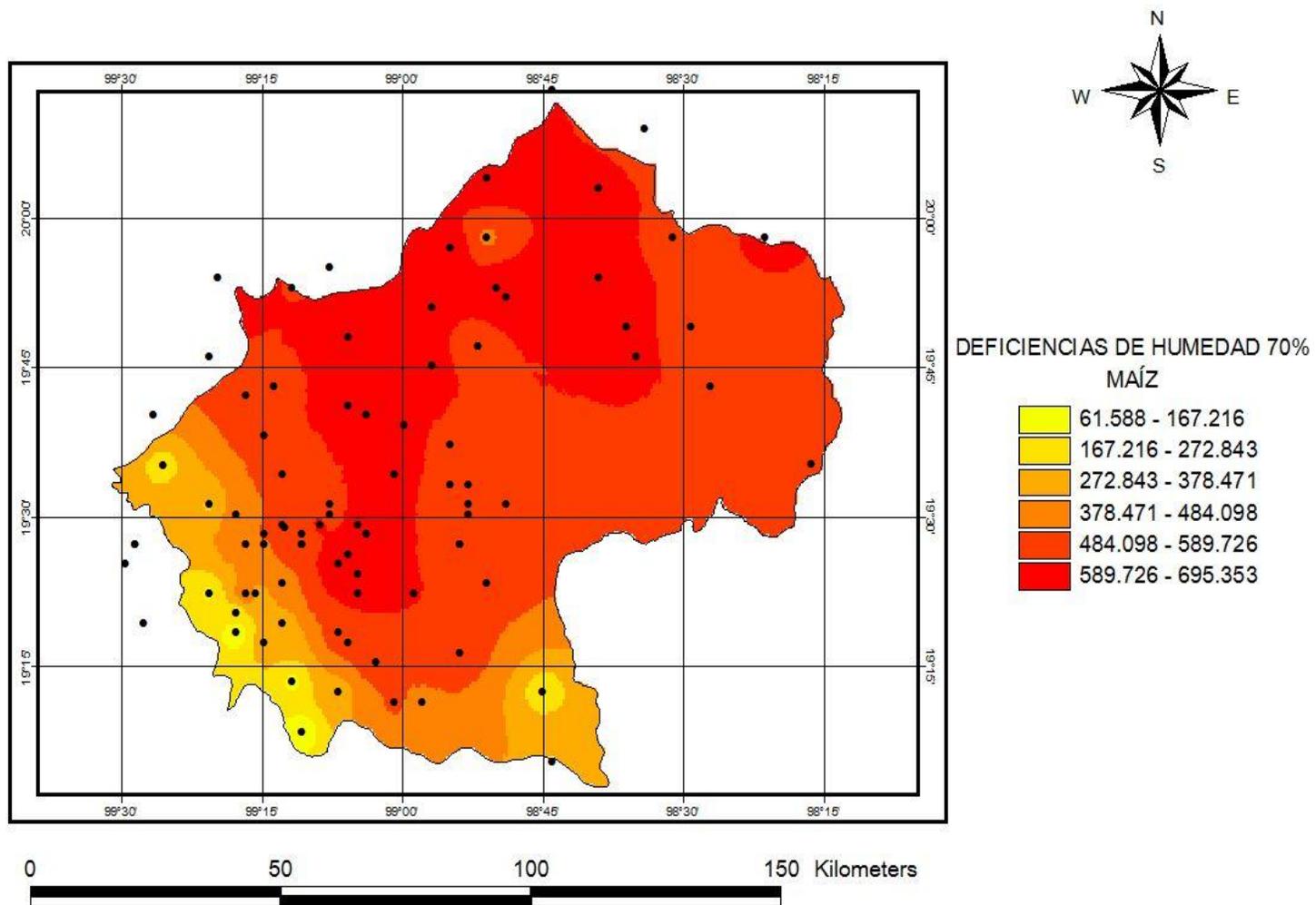


Figura 17A. Deficiencias de humedad durante la estacion de crecimiento de Maíz para una probabilidad de 70%.

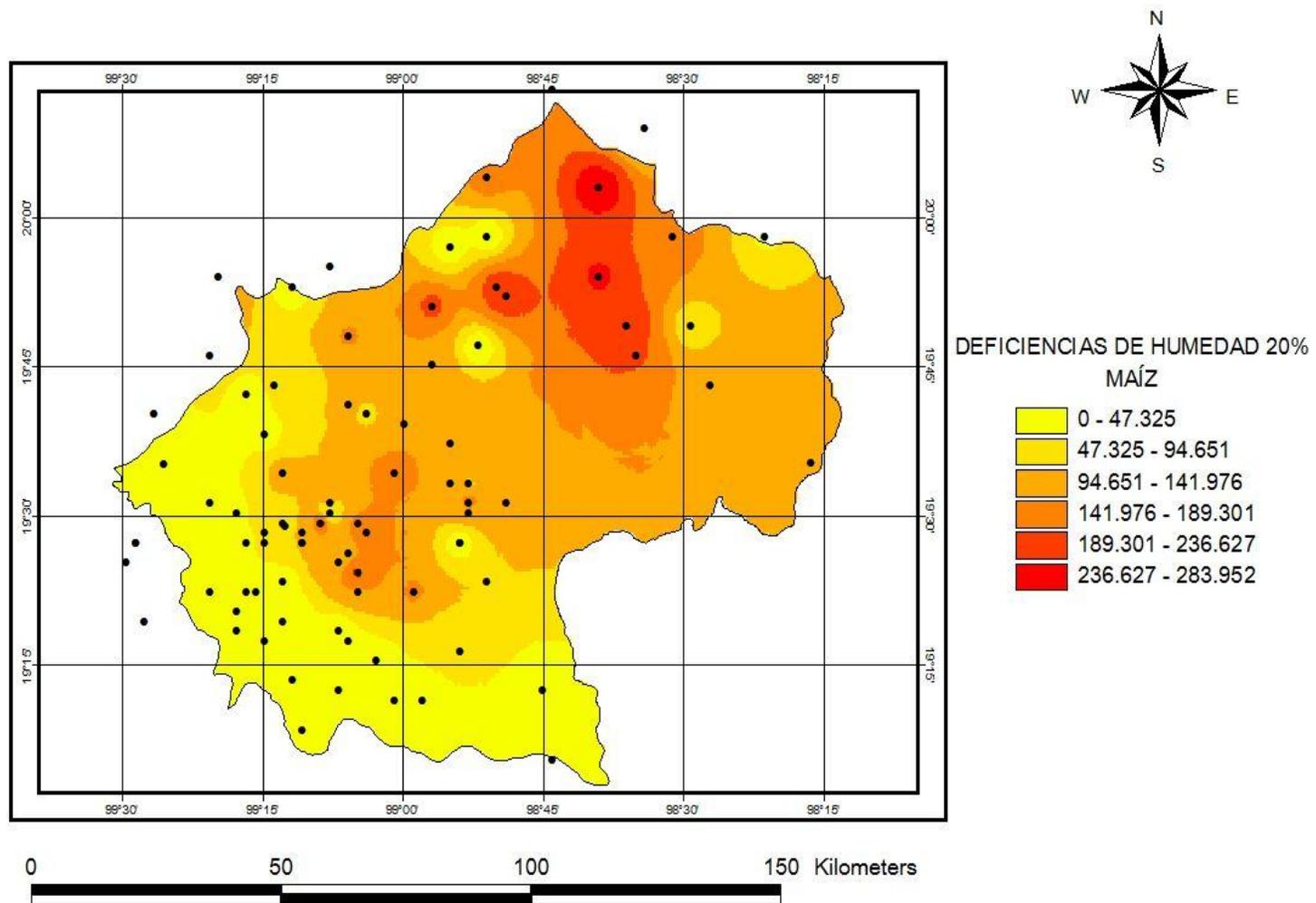


Figura 18A. Deficiencias de humedad durante la estacion de crecimiento de Maíz para una probabilidad de 20%.

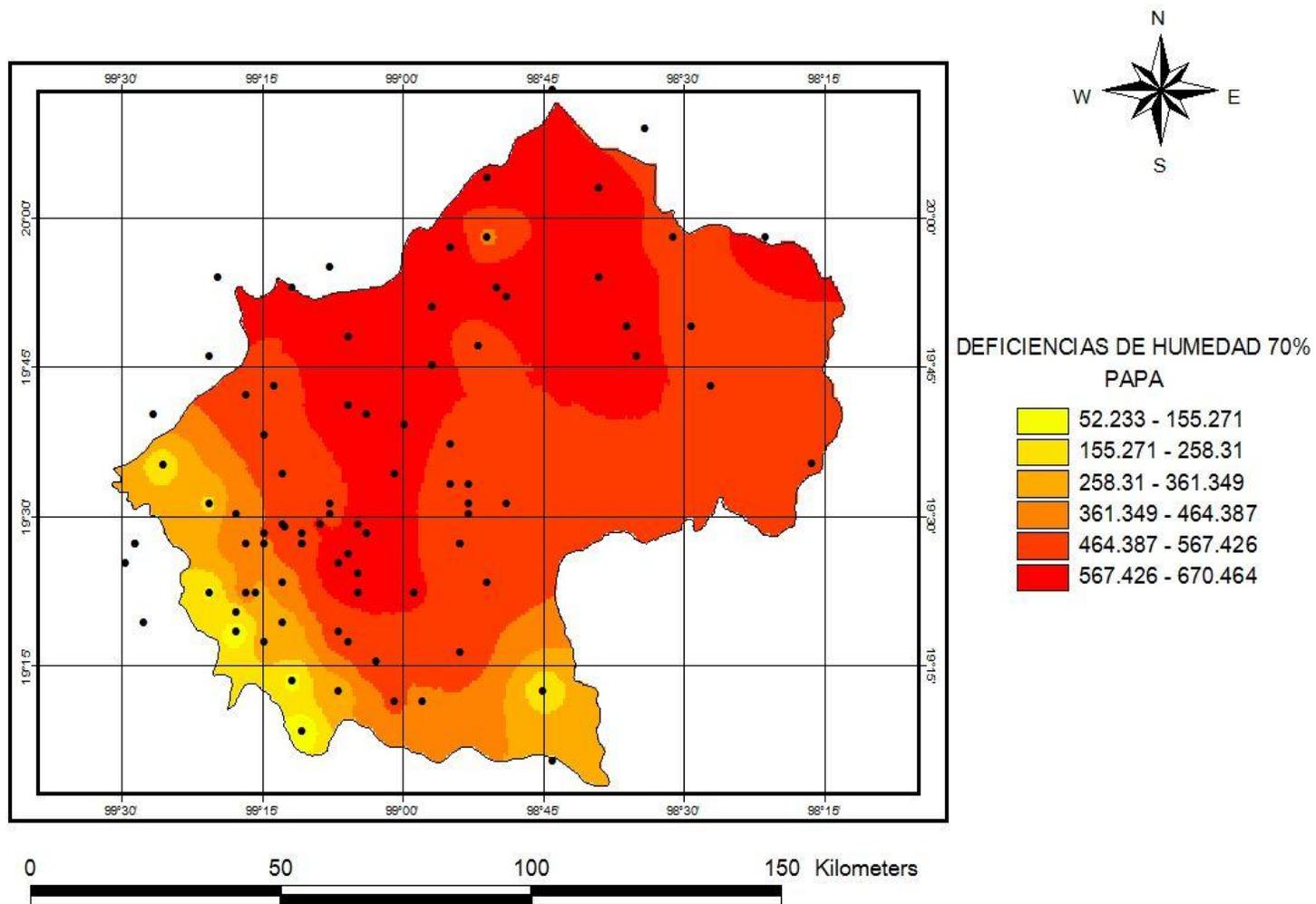


Figura 19A. Deficiencias de humedad durante la estacion de crecimiento de Papa para una probabilidad de 70%.

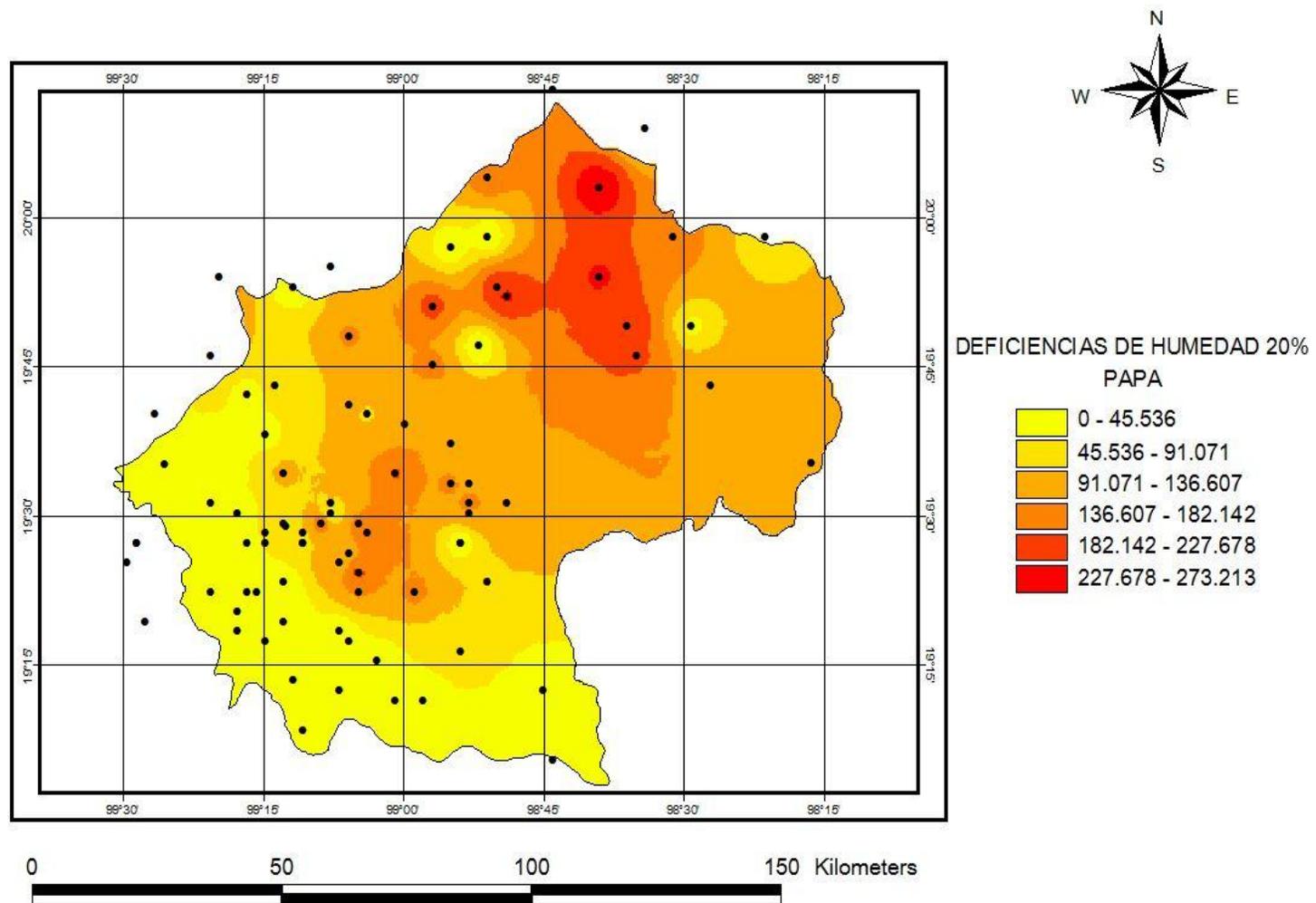


Figura 20A. Deficiencias de humedad durante la estacion de crecimiento de Papa para una probabilidad de 20%.

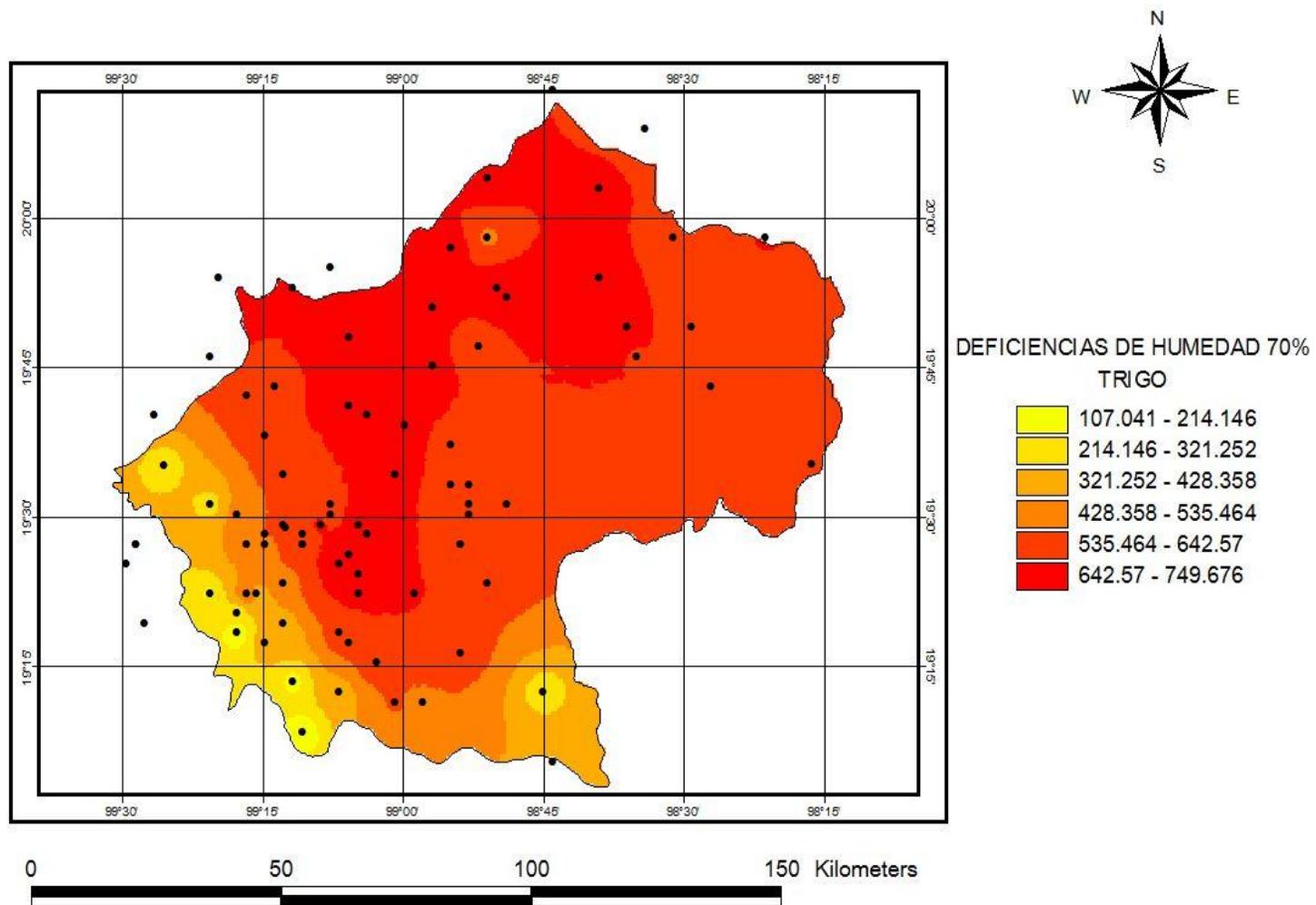


Figura 21A. Deficiencias de humedad durante la estacion de crecimiento de Trigo para una probabilidad de 70%.

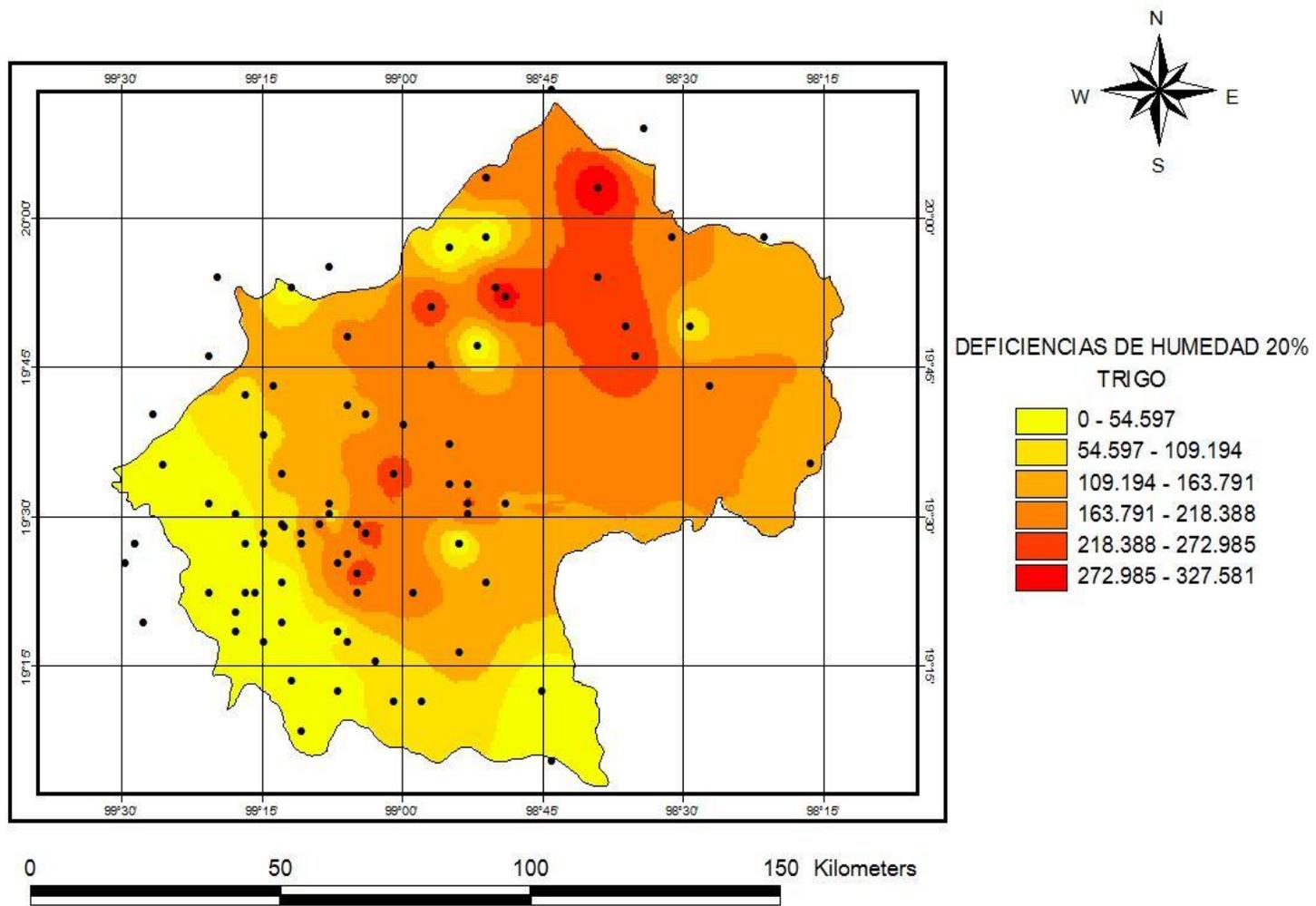


Figura 22A. Deficiencias de humedad durante la estacion de crecimiento de Trigo para una probabilidad de 20%.

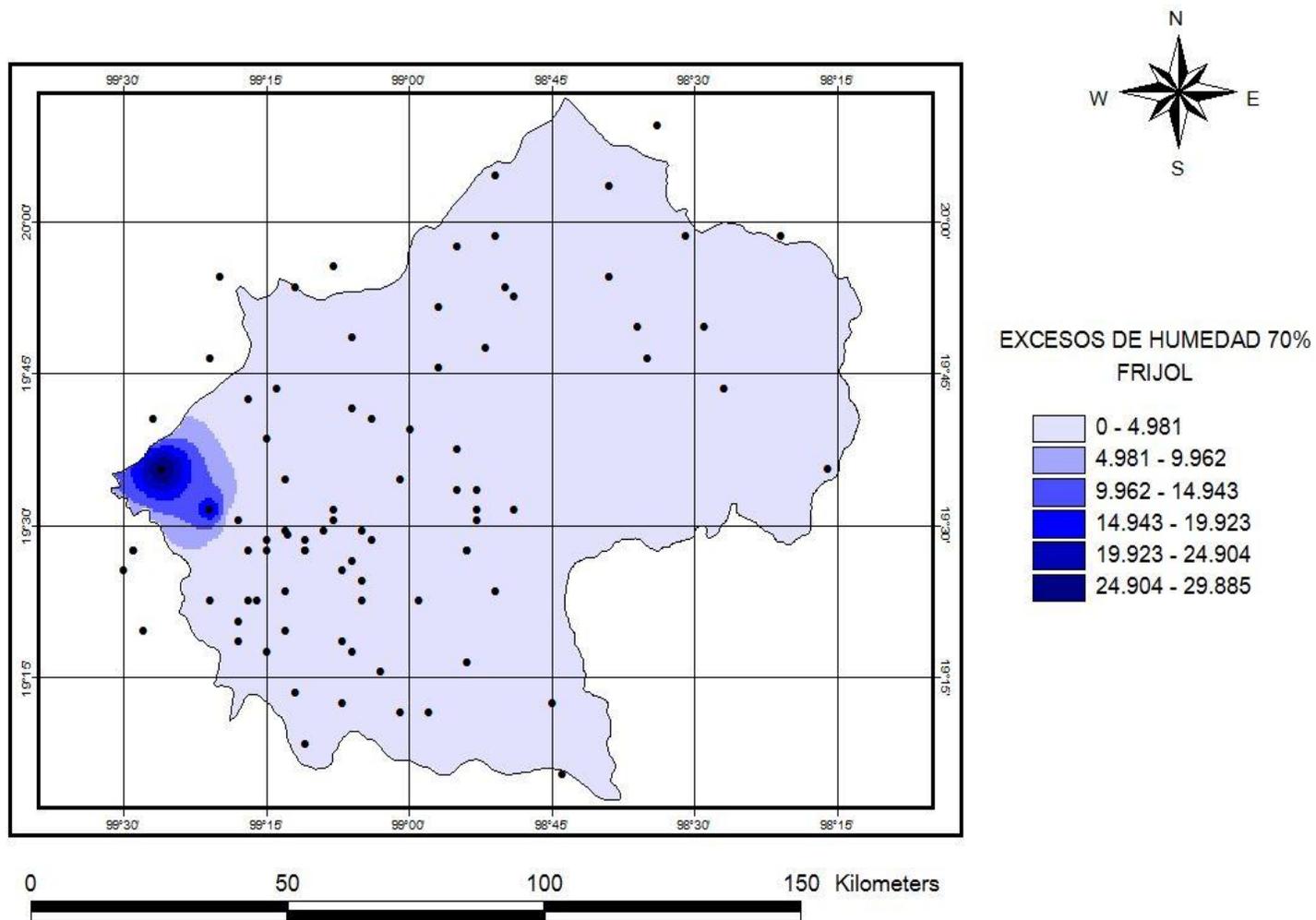


Figura 23A. Excesos de humedad durante la estacion de crecimiento de Frijol para una probabilidad de 70%.

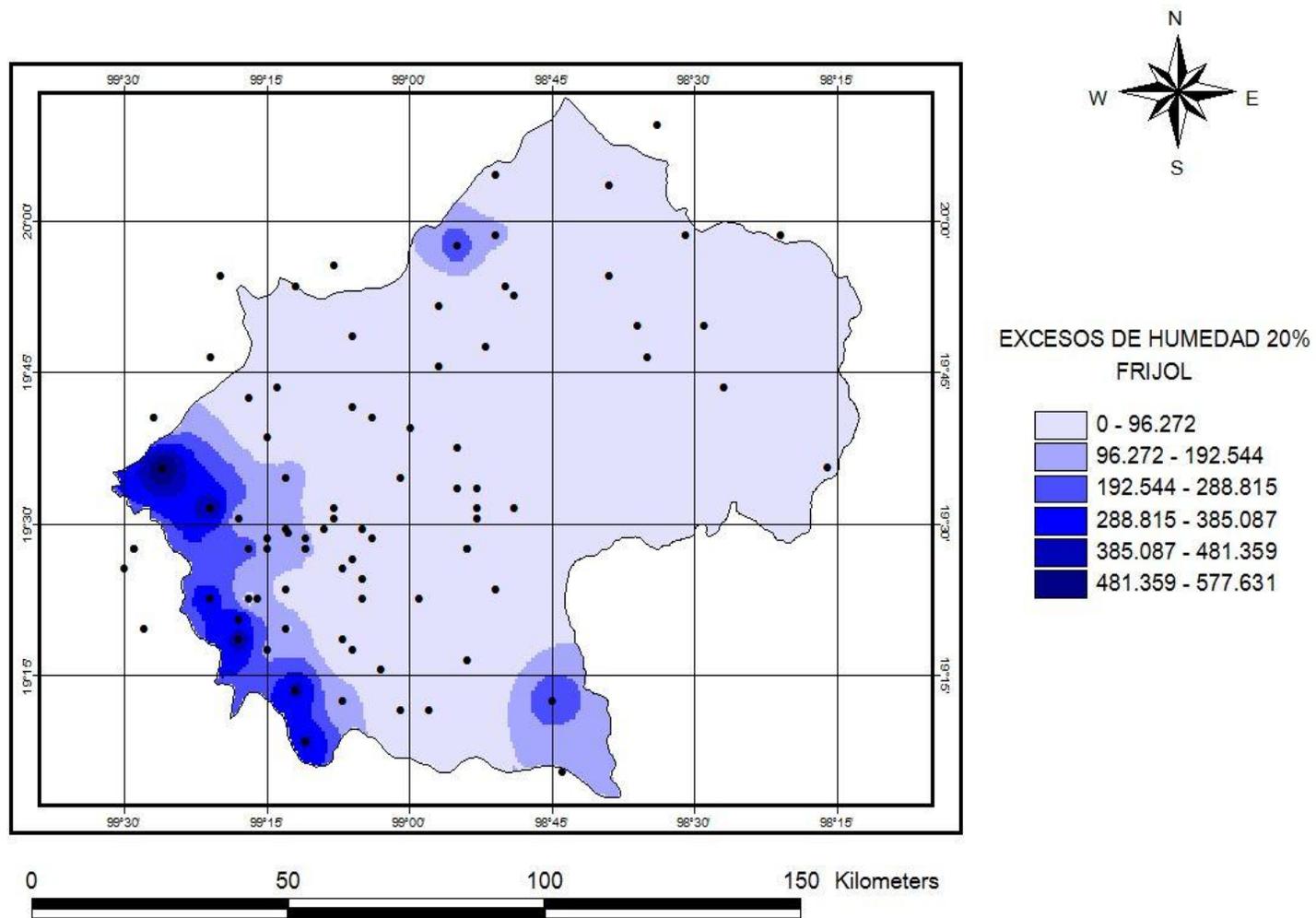


Figura 24A. Excesos de humedad durante la estacion de crecimiento de Frijol para una probabilidad de 20%.

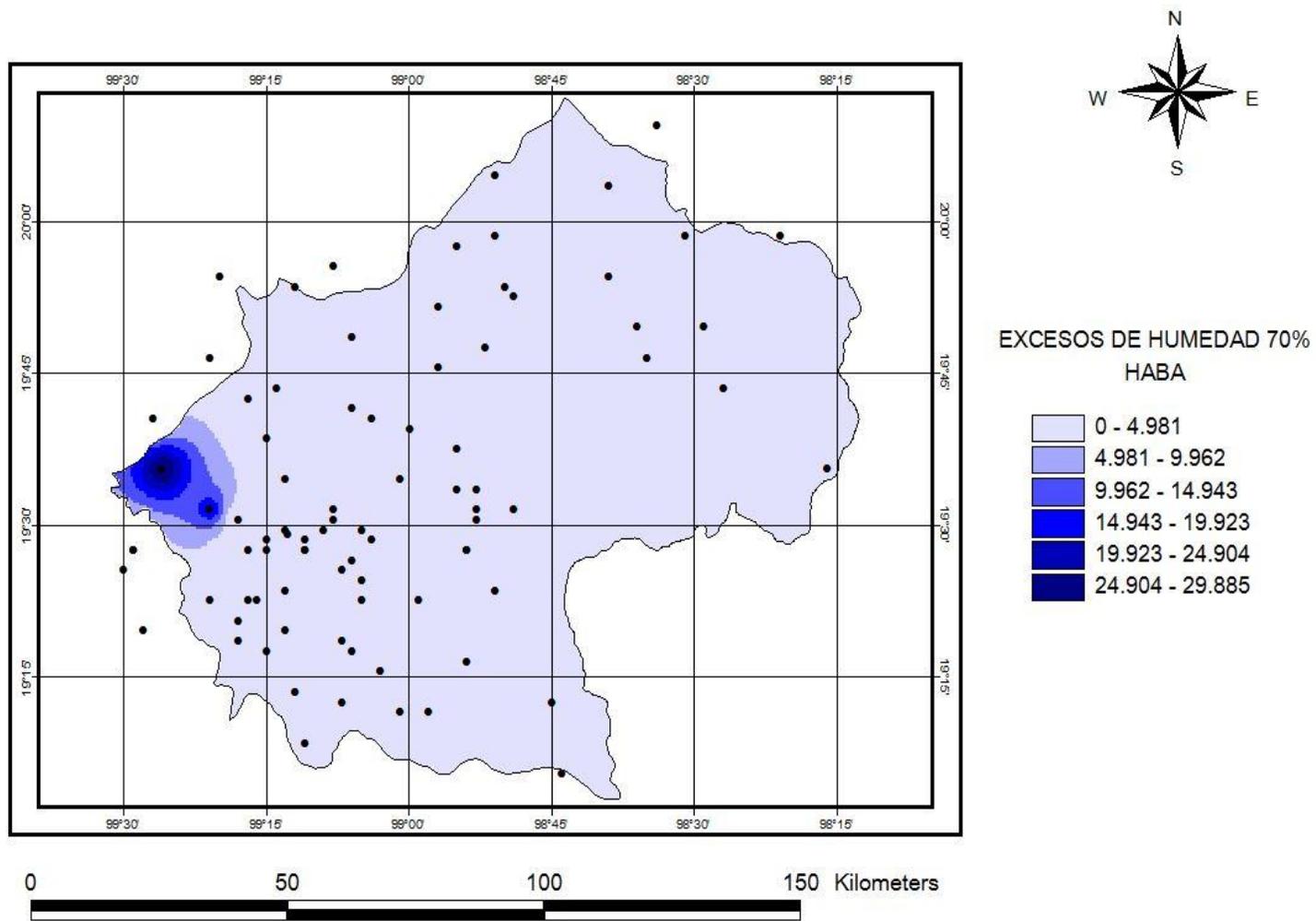


Figura 25A. Excesos de humedad durante la estacion de crecimiento de Haba para una probabilidad de 70%.

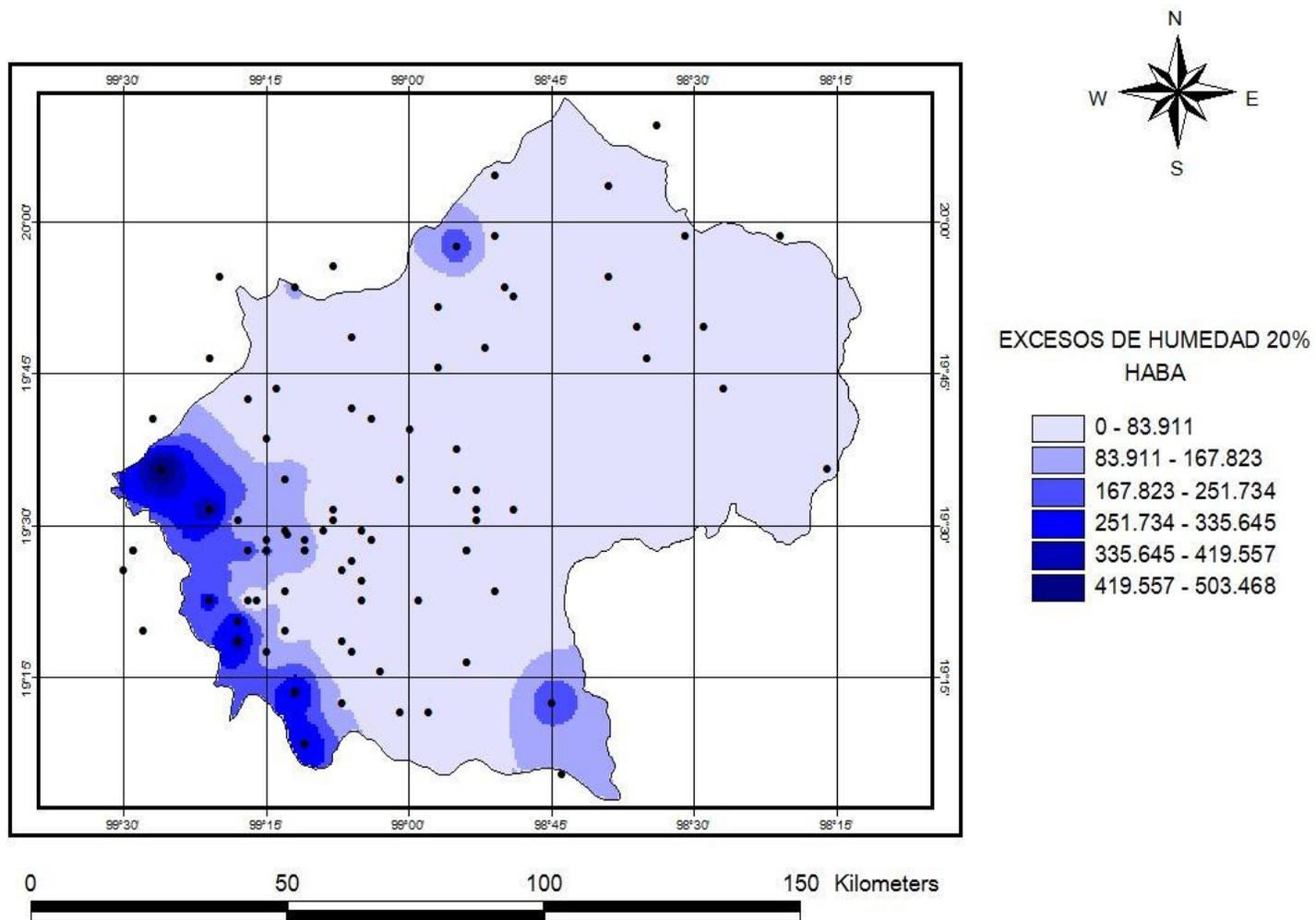


Figura 26A. Excesos de humedad durante la estacion de crecimiento de Haba para una probabilidad de 20%.

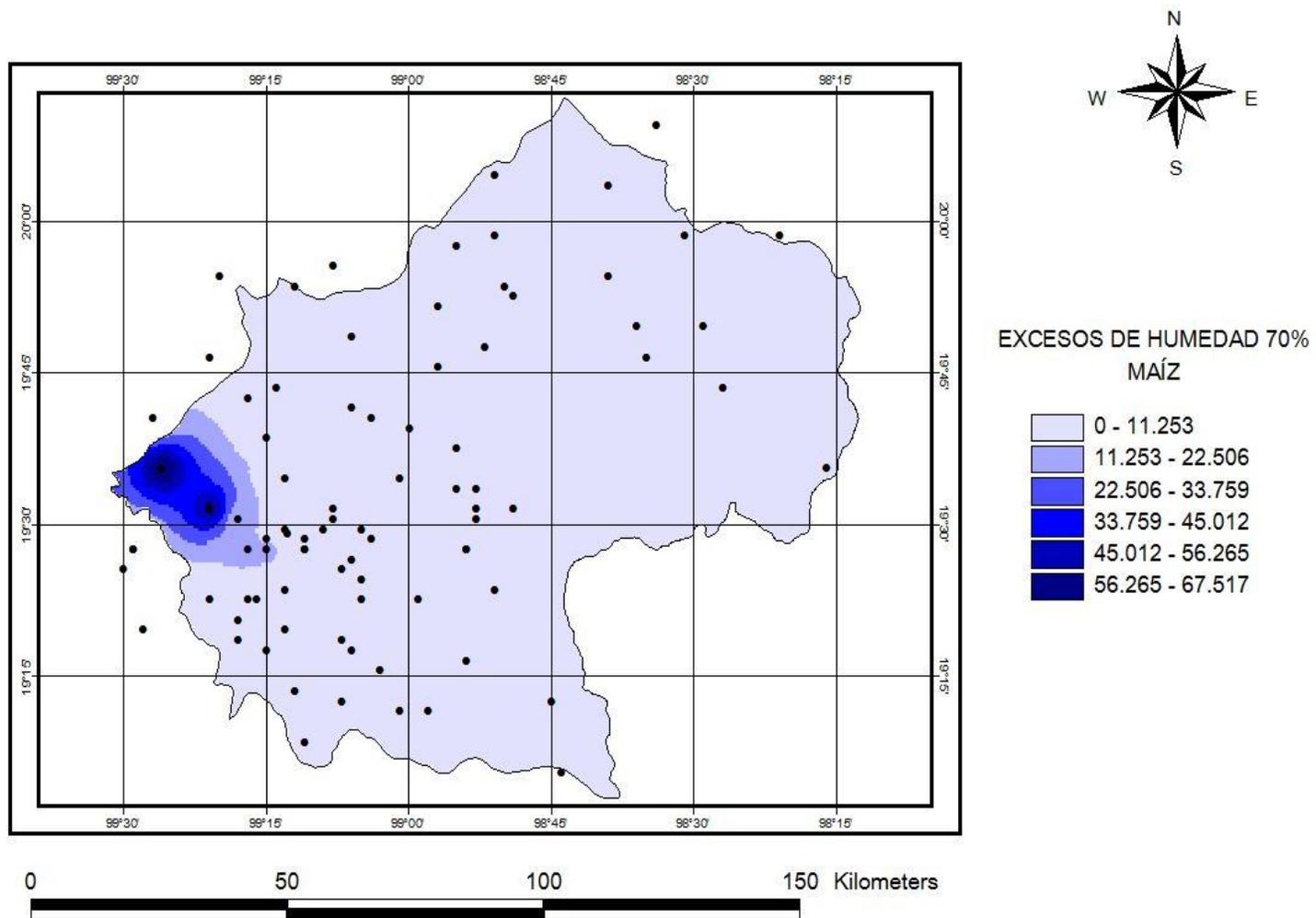


Figura 27A. Excesos de humedad durante la estacion de crecimiento de Maíz para una probabilidad de 70%.

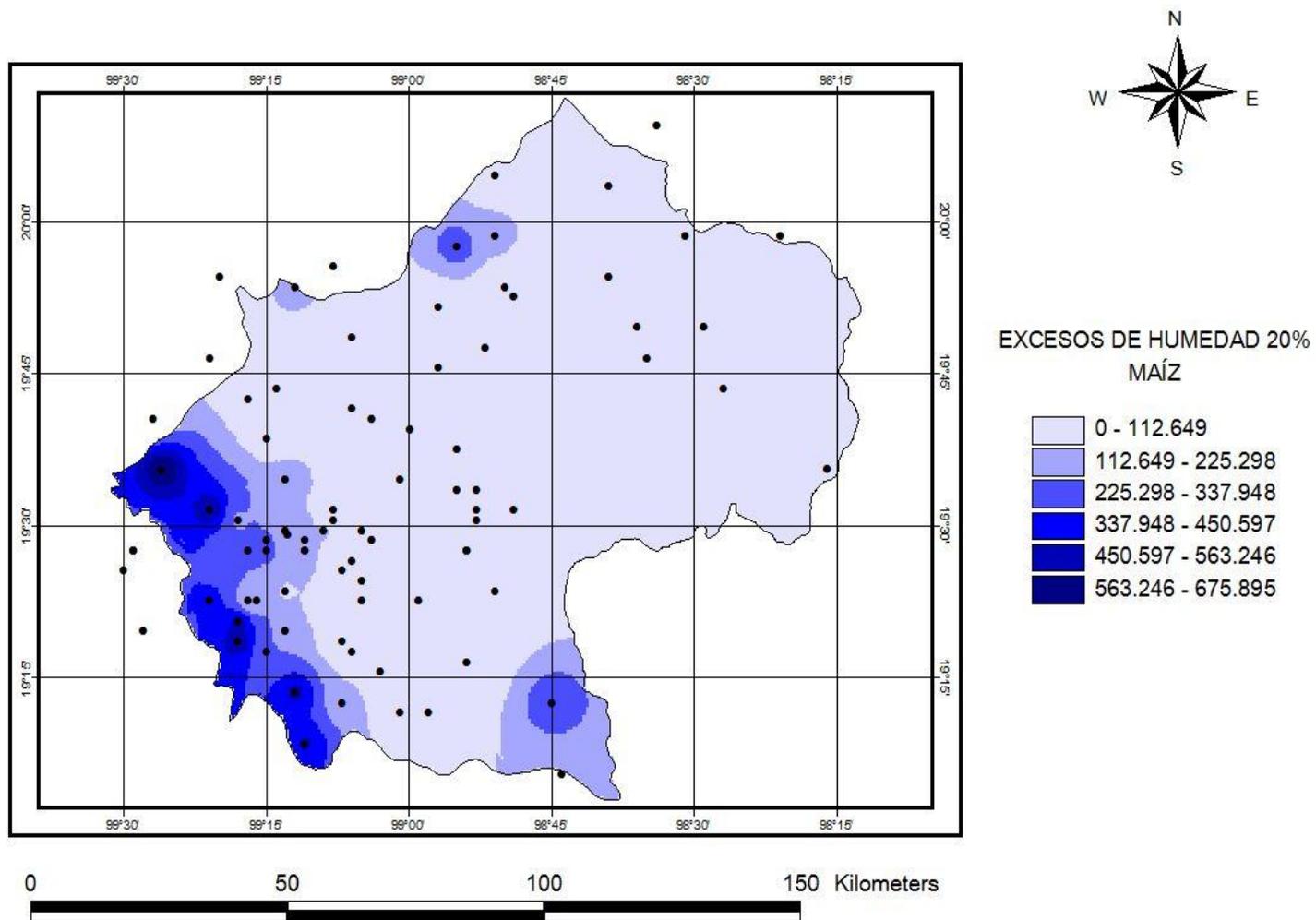


Figura 28A. Excesos de humedad durante la estacion de crecimiento de Maíz para una probabilidad de 20%.

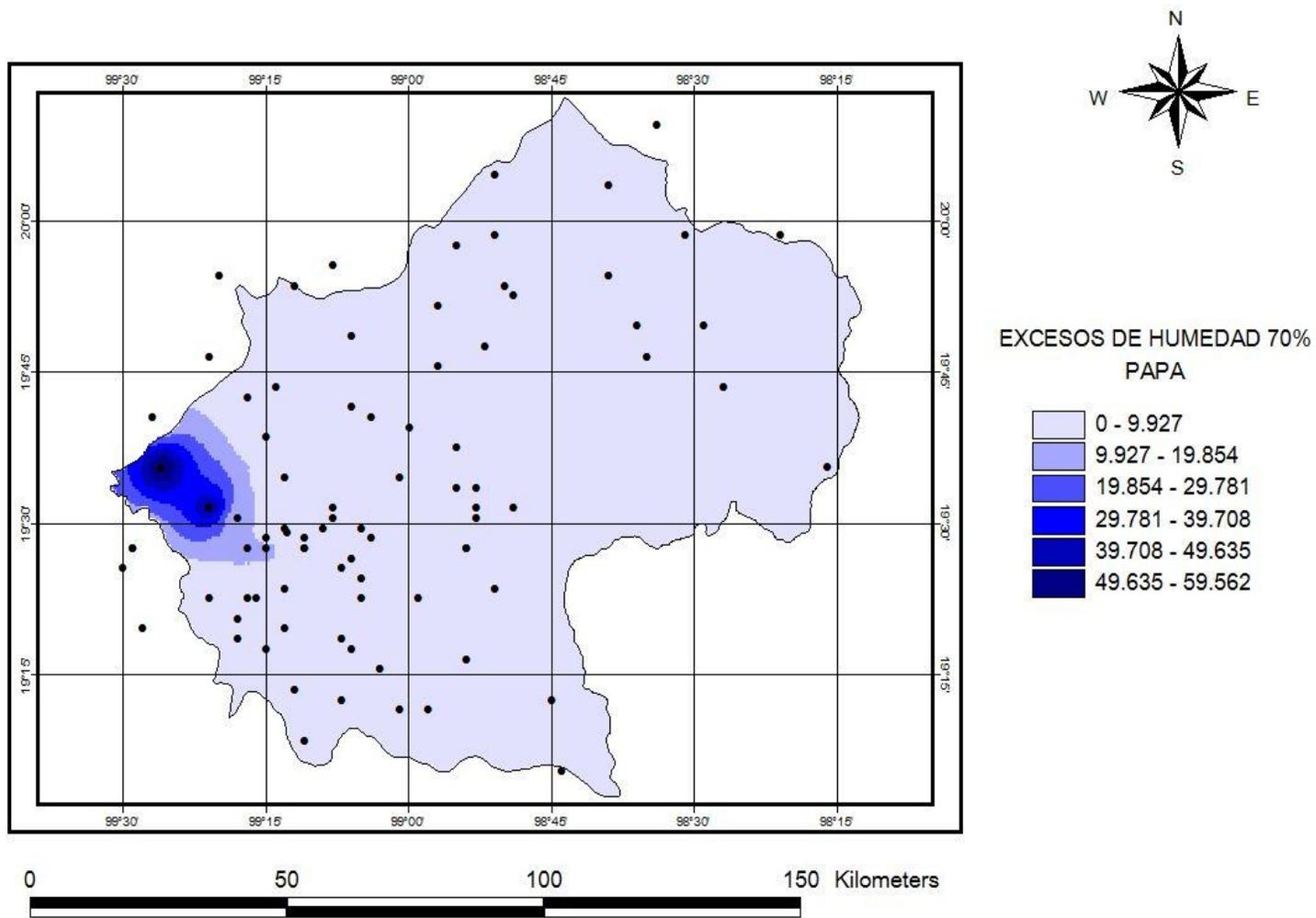


Figura 29A. Excesos de humedad durante la estacion de crecimiento de Papa para una probabilidad de 70%.

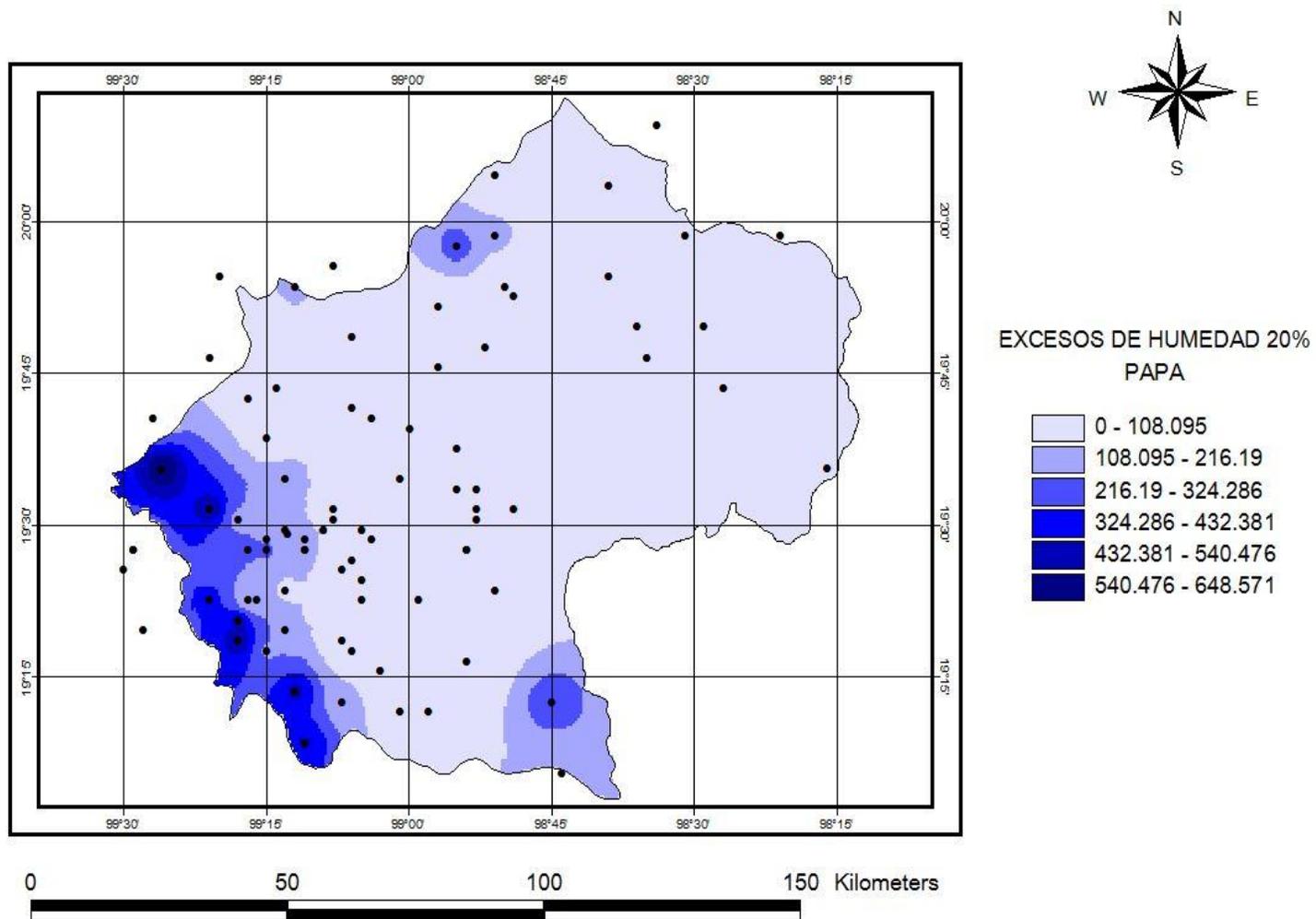


Figura 30A. Excesos de humedad durante la estacion de crecimiento de Papa para una probabilidad de 20%.

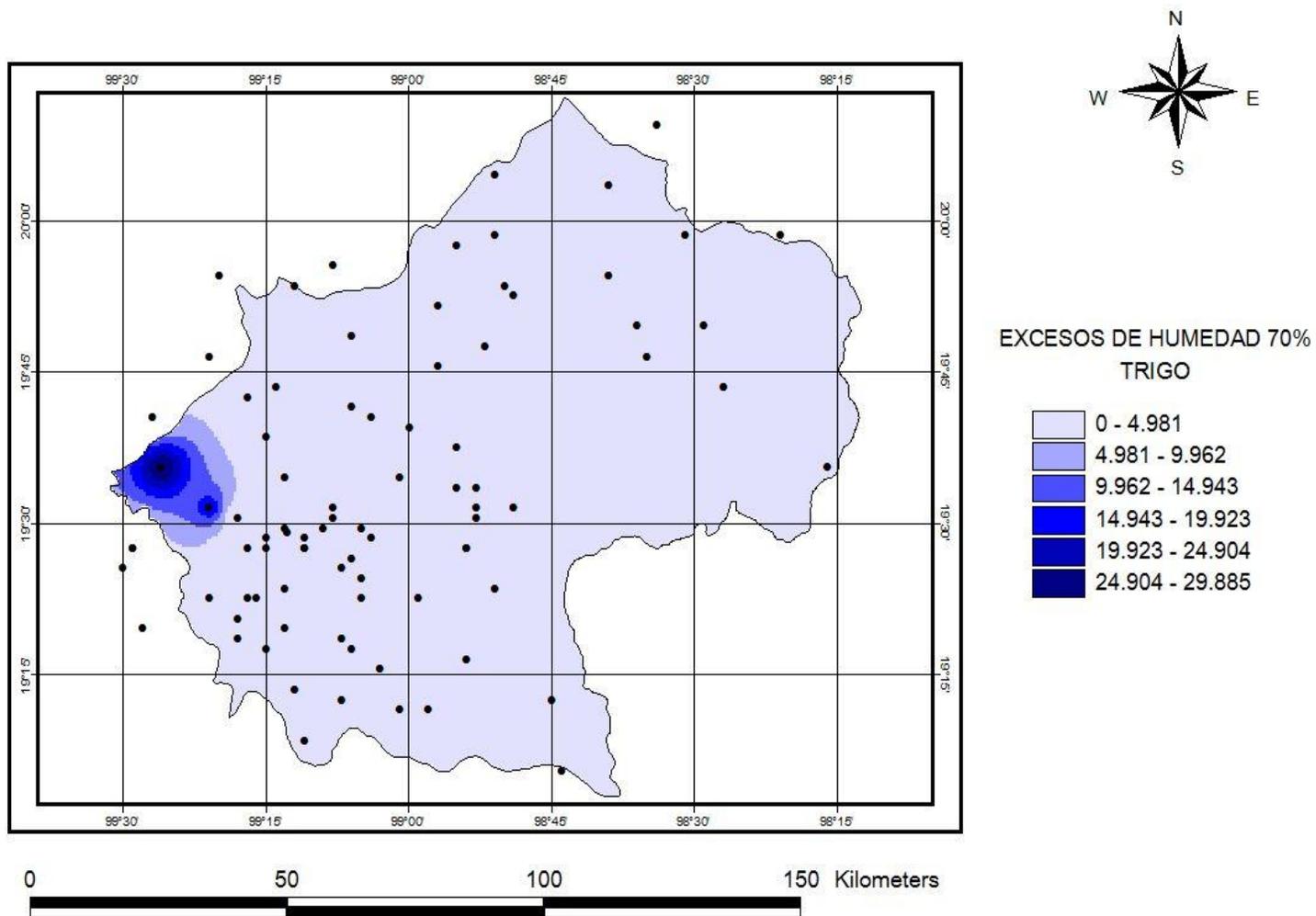


Figura 31A. Excesos de humedad durante la estacion de crecimiento de Trigo para una probabilidad de 70%.

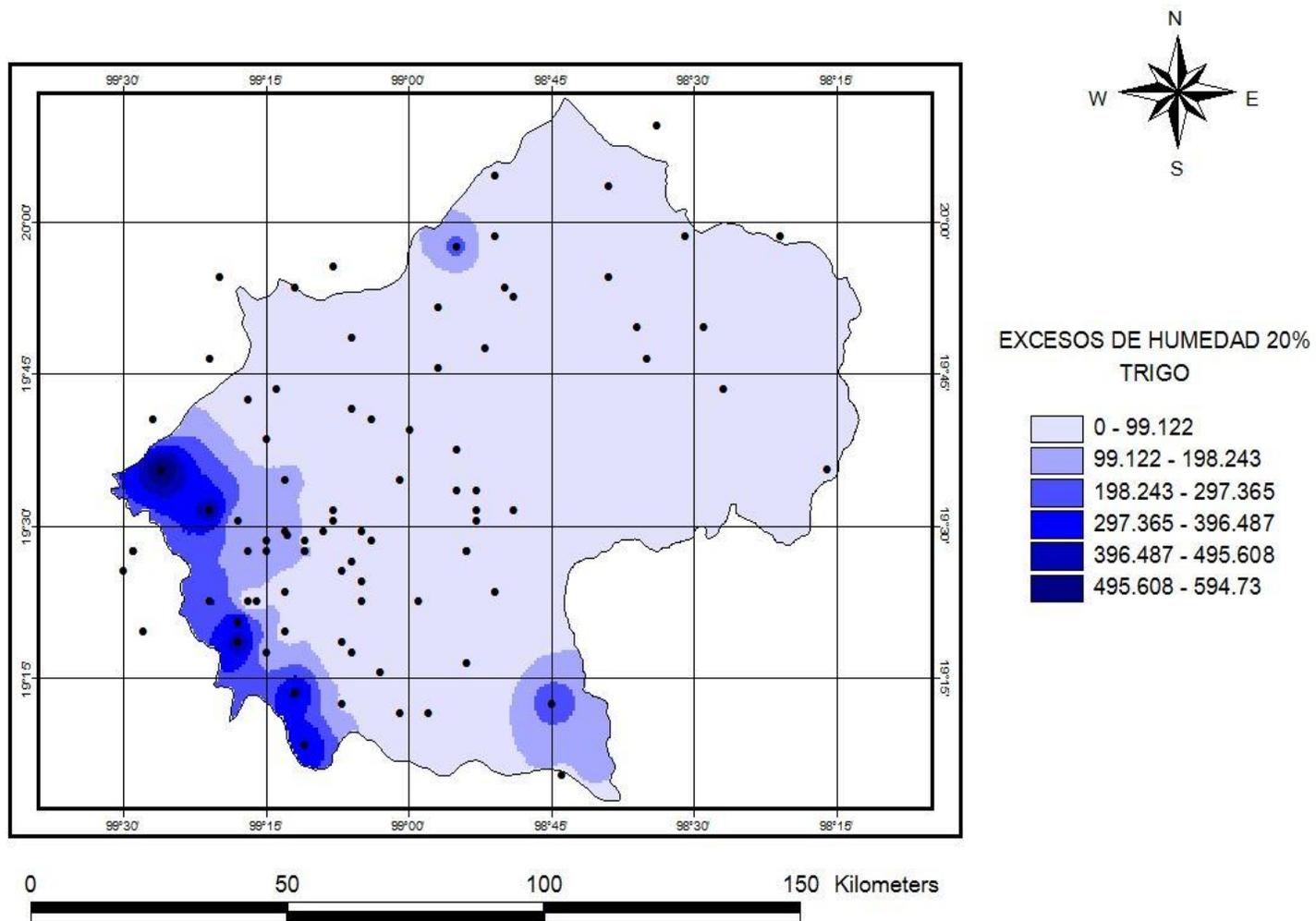


Figura 32A. Excesos de humedad durante la estacion de crecimiento de Trigo para una probabilidad de 20%.

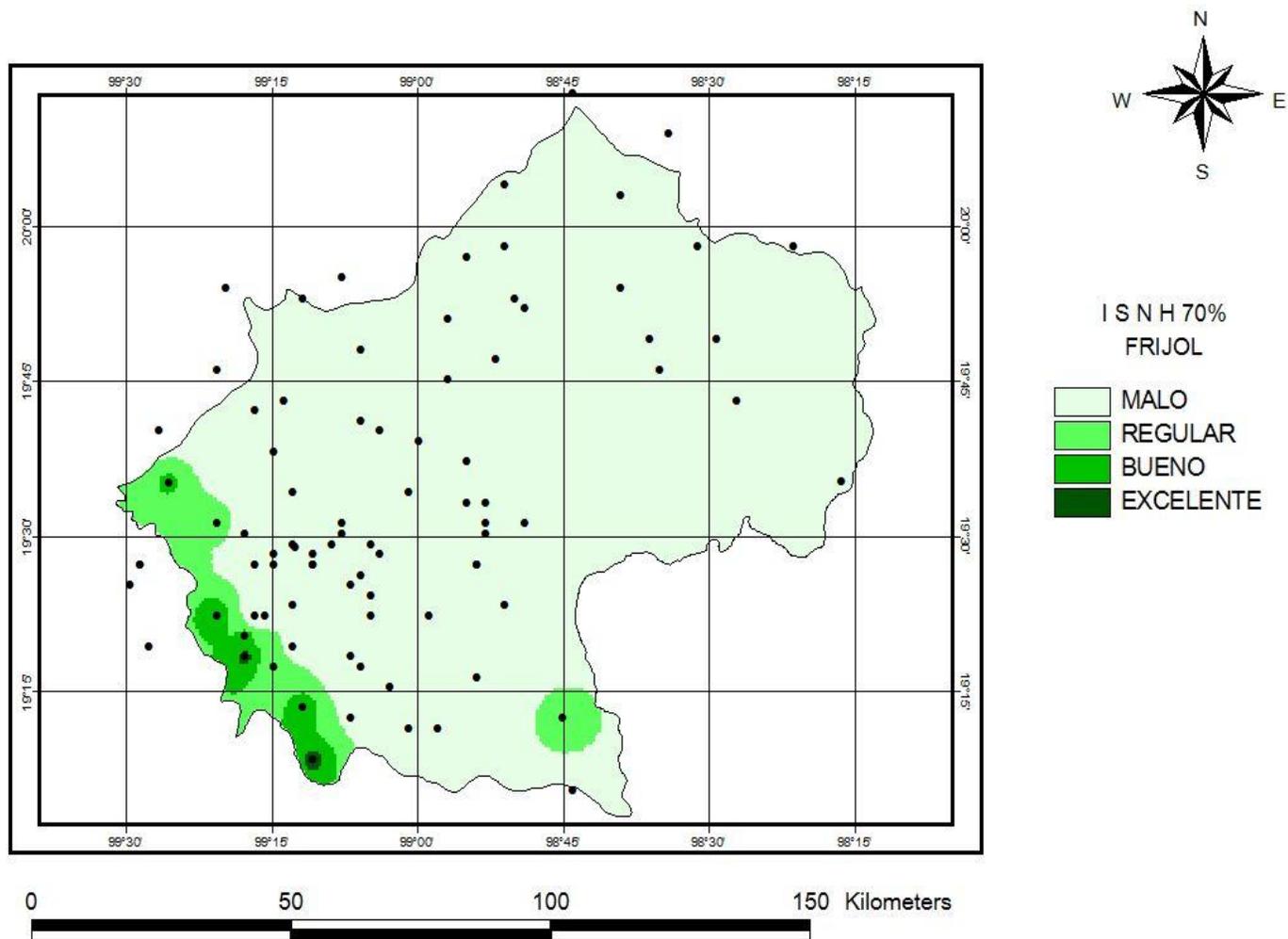


Figura 33A. Índice de Satisfacción de Necesidades Hidricas del cultivo de Frijol para una probabilidad del 70%.

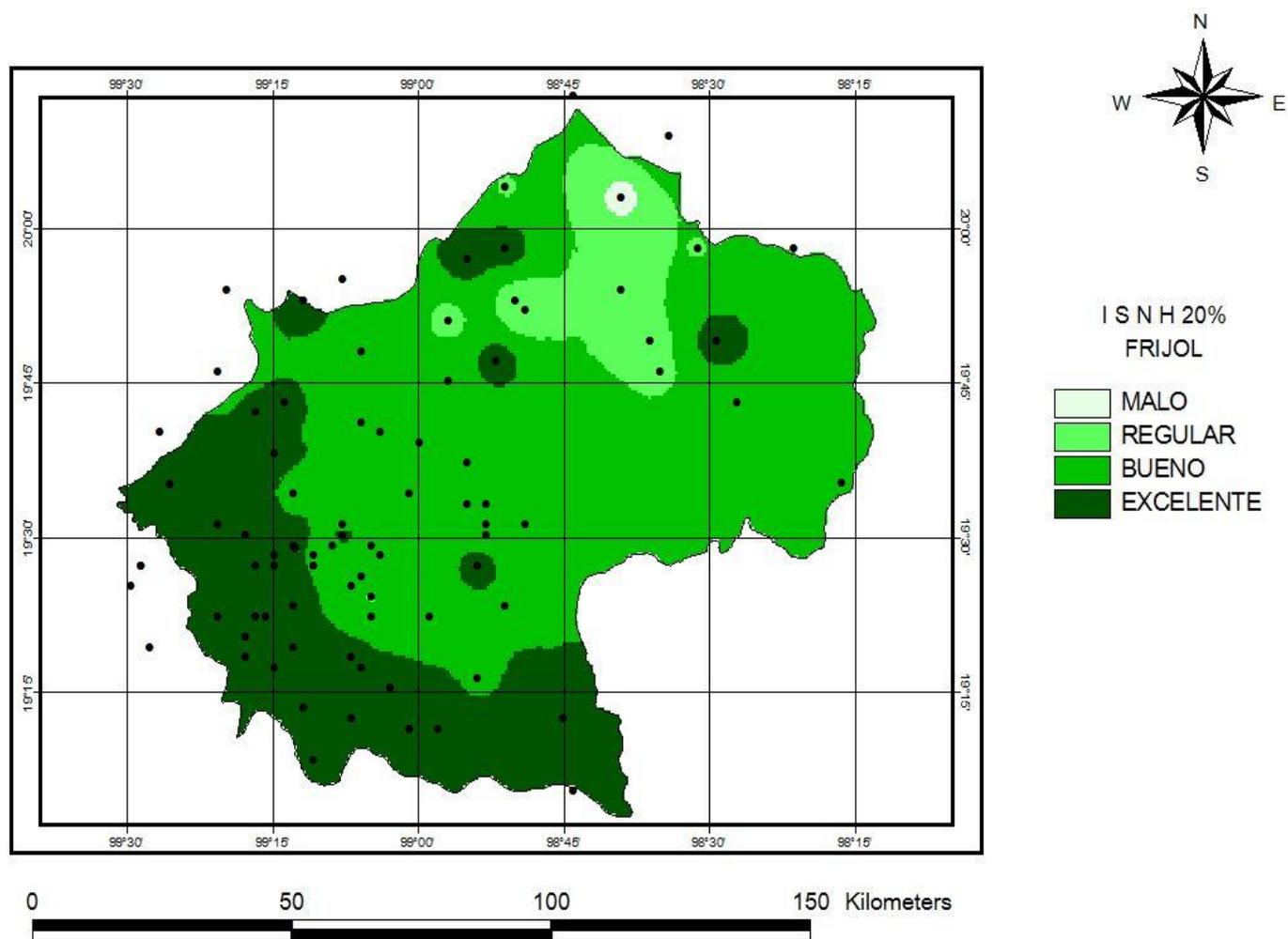


Figura 34A. Índice de Satisfacción de Necesidades Hidricas del cultivo de Frijol para una probabilidad del 20%.

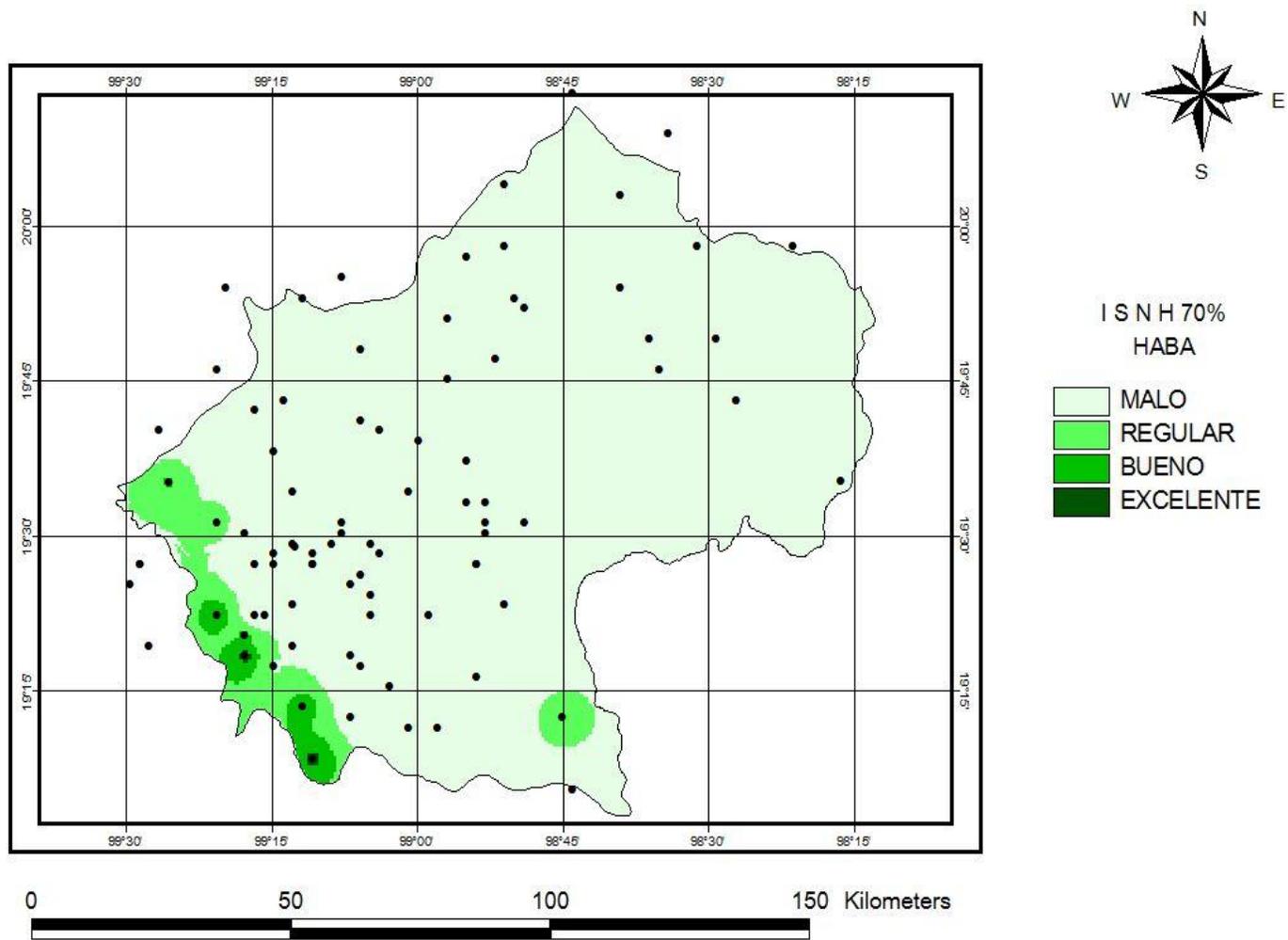


Figura 35A. Índice de Satisfacción de Necesidades Hidricas del cultivo de Haba para una probabilidad del 70%.

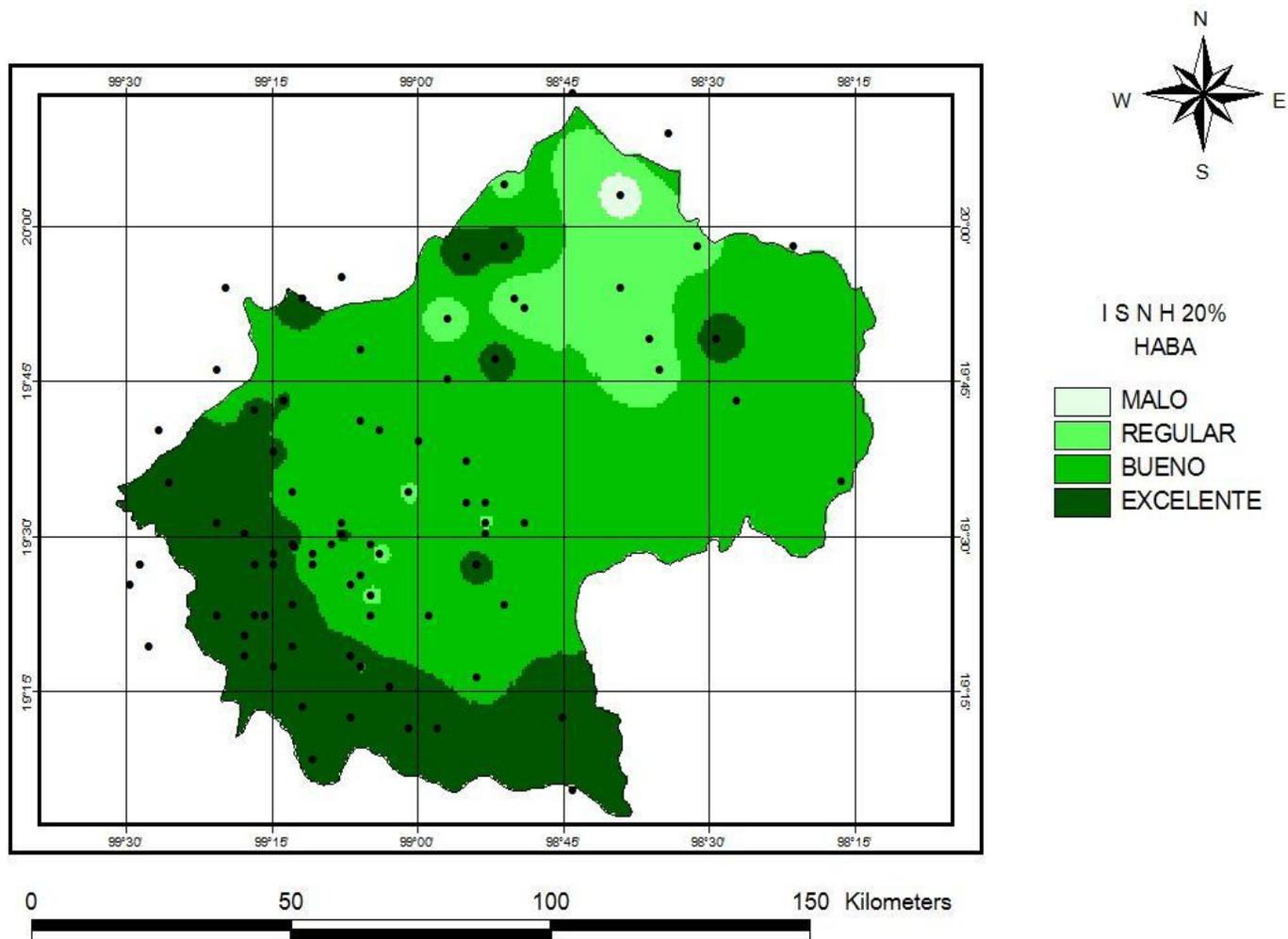


Figura 36A. Índice de Satisfacción de Necesidades Hidricas del cultivo de Haba para una probabilidad del 20%.

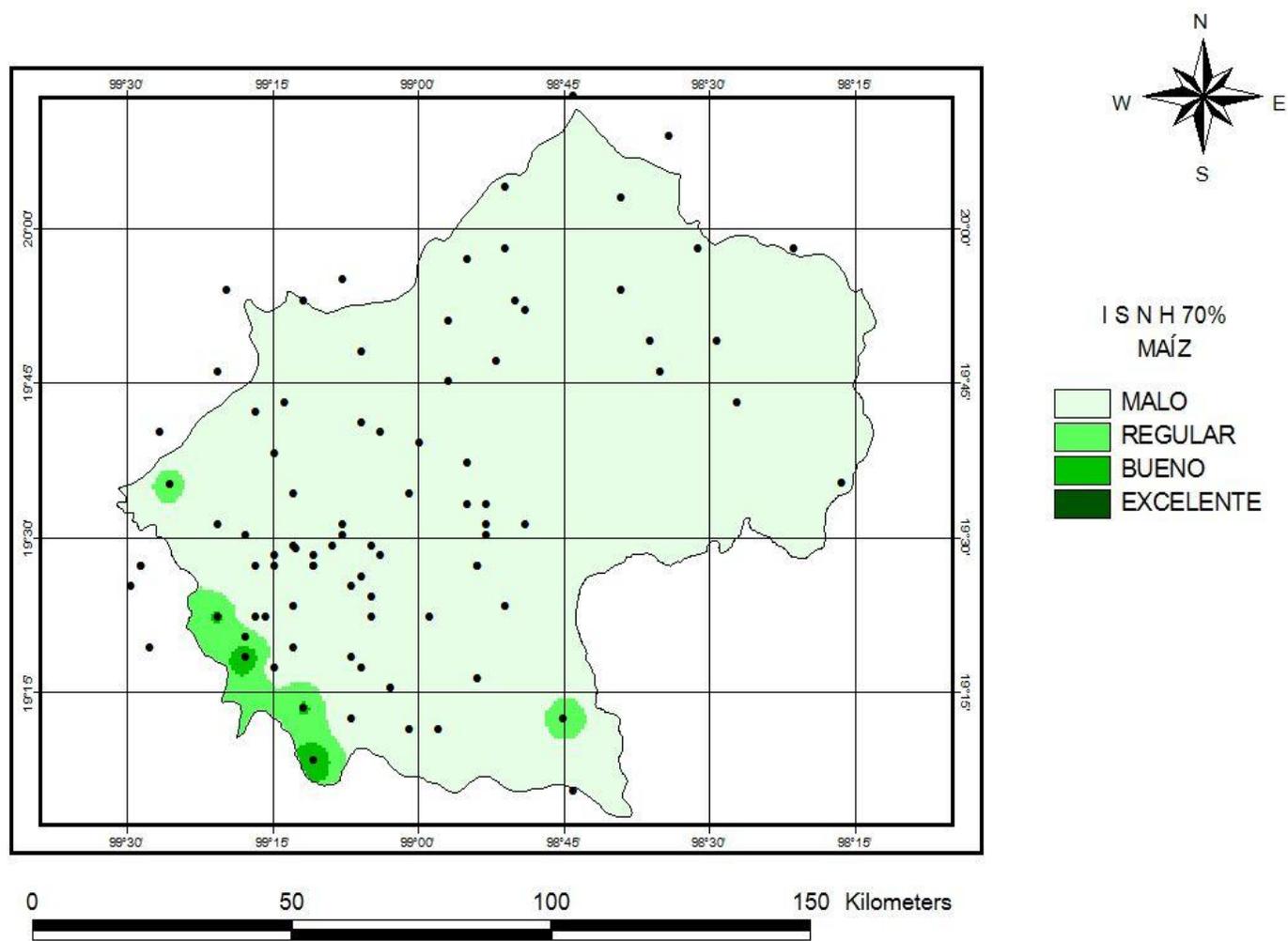


Figura 37A. Índice de Satisfacción de Necesidades Hidricas del cultivo de Maíz para una probabilidad del 70%.

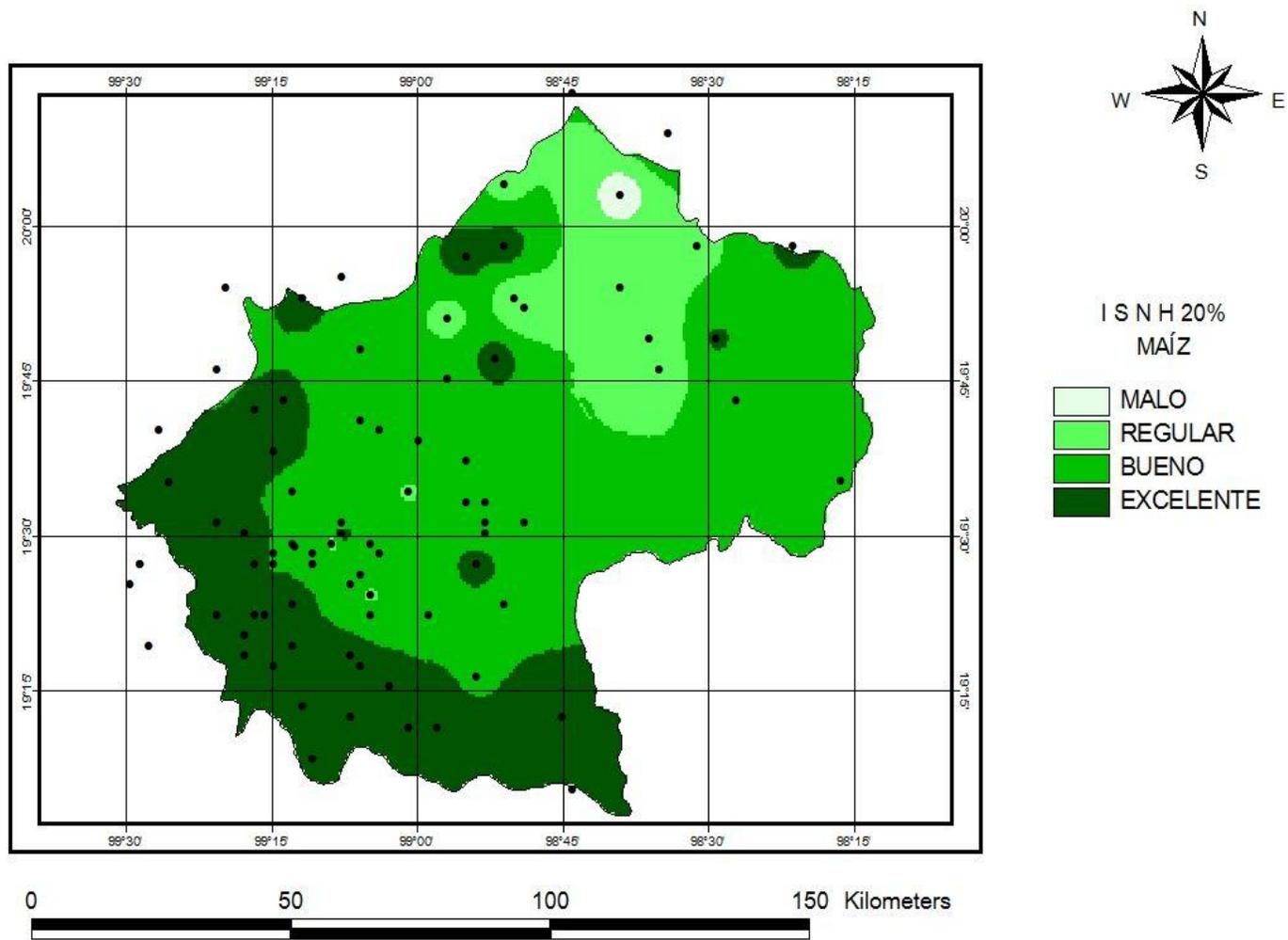


Figura 38A. Índice de Satisfacción de Necesidades Hidricas del cultivo de Maíz para una probabilidad del 20%.

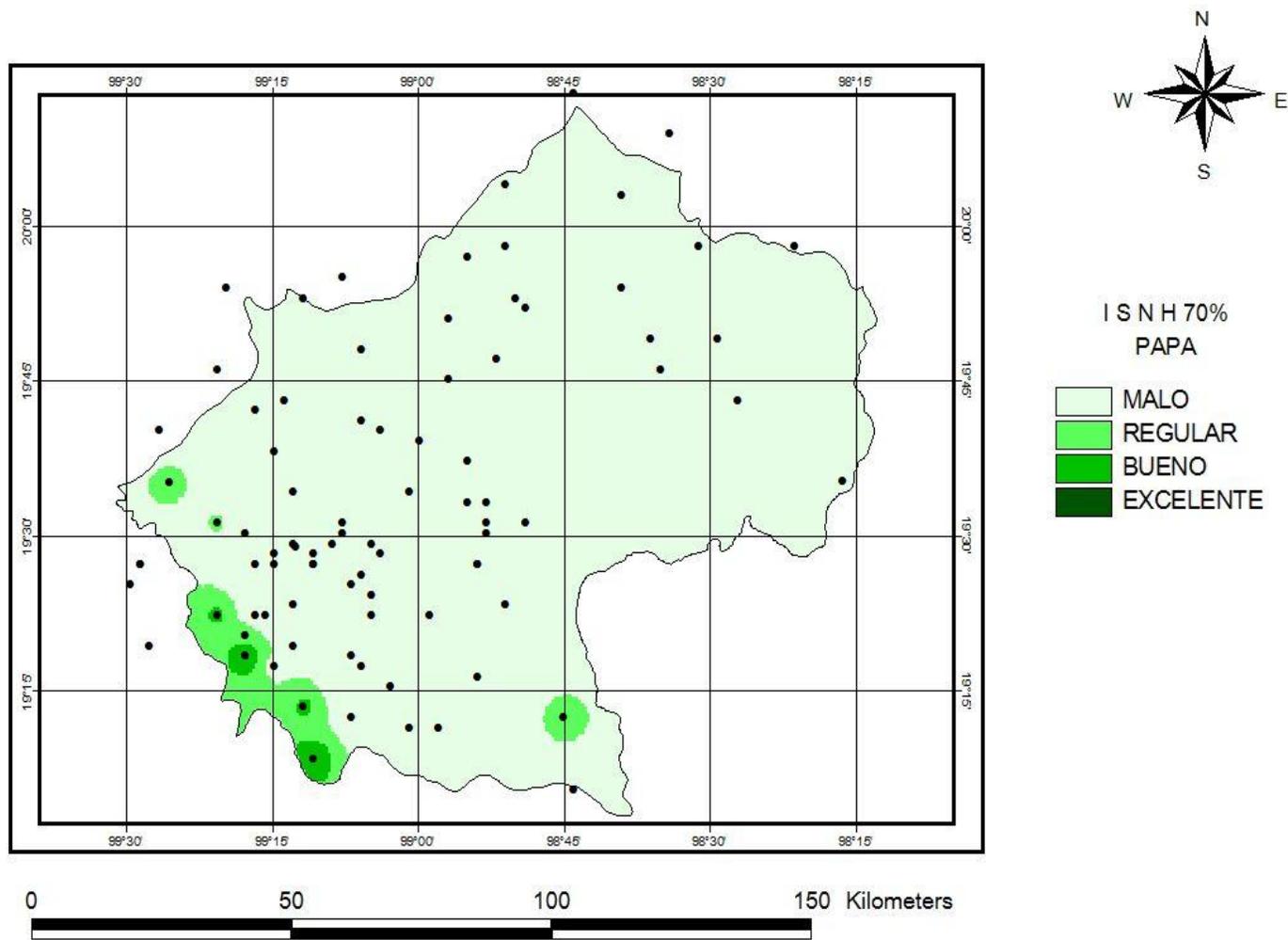


Figura 39A. Índice de Satisfacción de Necesidades Hidricas del cultivo de Papa para una probabilidad del 70%.

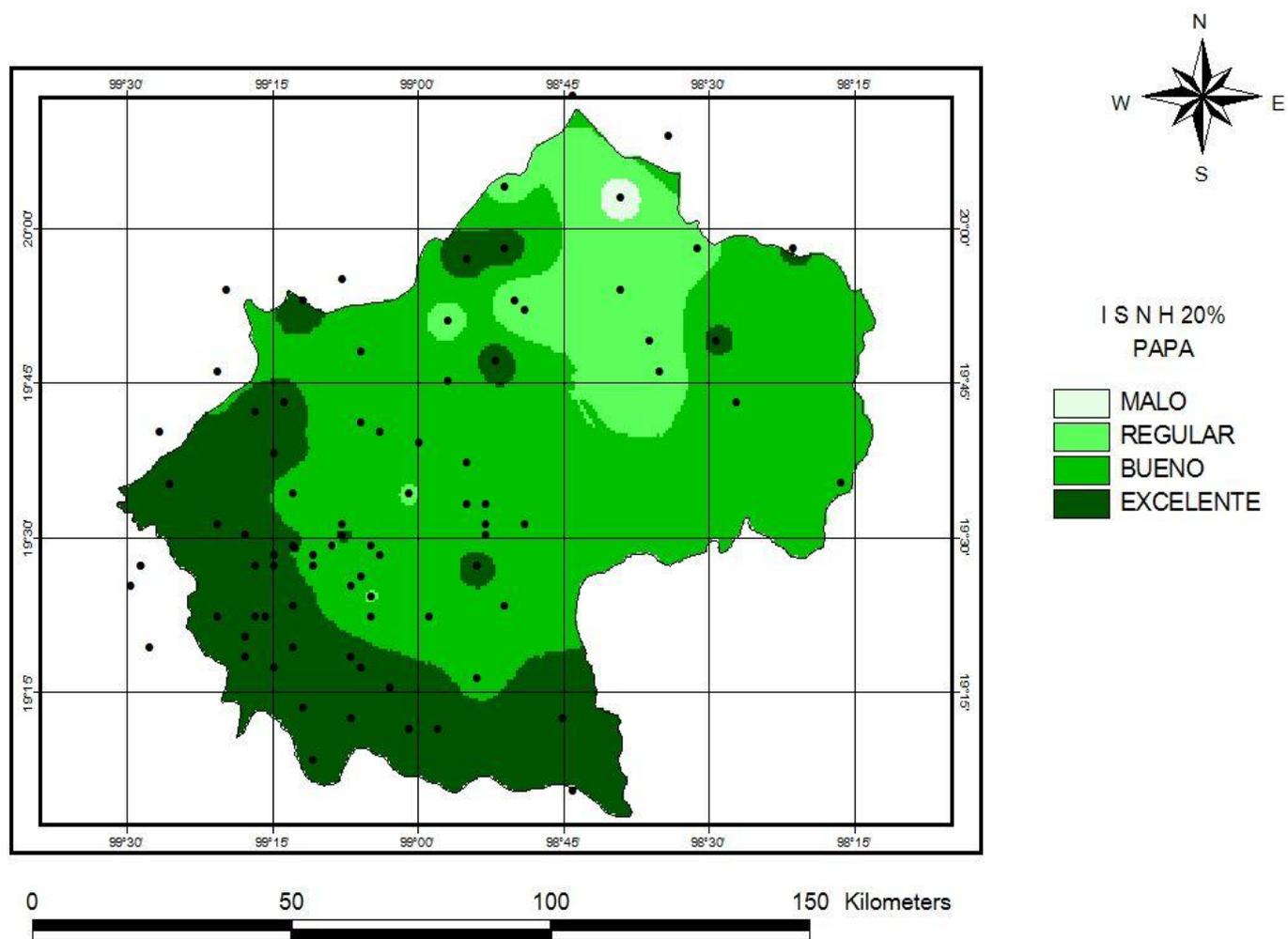


Figura 40A. Índice de Satisfacción de Necesidades Hidricas del cultivo de Papa para una probabilidad del 20%.

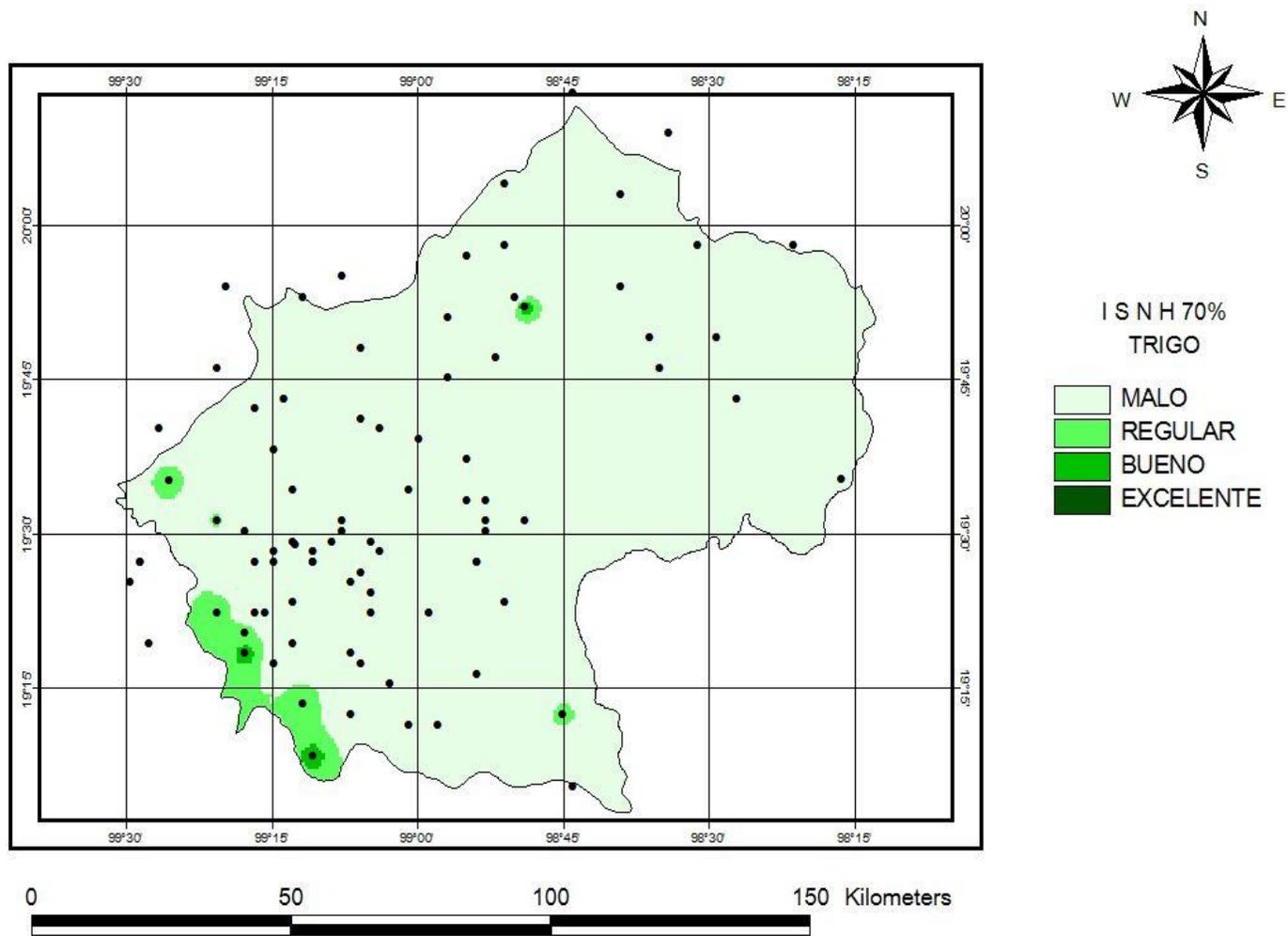


Figura 41A. Índice de Satisfacción de Necesidades Hidricas del cultivo de Trigo para una probabilidad del 70%.

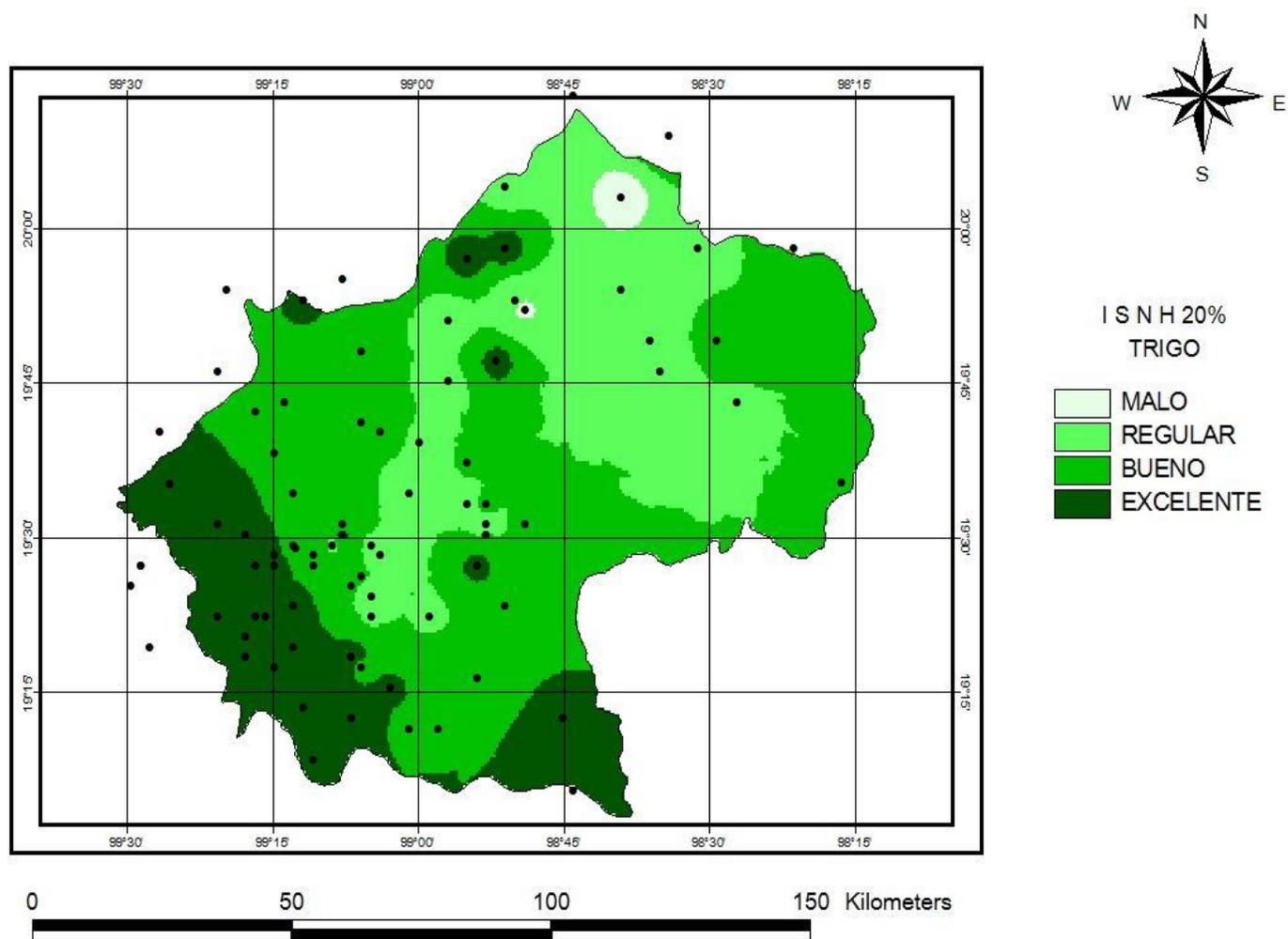


Figura 42A. Índice de Satisfacción de Necesidades Hidricas del cultivo de Trigo para una probabilidad del 20%.