



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

PLAN DE APROVECHAMIENTO DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIA PARA CULTIVOS
ZONA MAYA DE QUINTANA ROO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
SERGIO DANIEL RIVERA MOLINA

TUTOR PRINCIPAL
DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. ABRIL 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. Domínguez Mora Ramón**
Secretario: **Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo**
Vocal: **Dr. Gracia Sánchez Jesús**
1^{er}. Suplente: **M. I. Franco Víctor**
2^{d o}. Suplente: **Dra. Ramos Hernández Judith G.**

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: **FACULTAD DE INGENIERÍA, CIUDAD
UNIVERSITARIA**

TUTOR DE TESIS:
DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

FIRMA

Contenido

1. Introducción	7
2. Plan de retención de agua en el paisaje rural.....	10
3. Zona Maya de Quintana Roo, caso de estudio: El Naranjal.....	14
a) Inventario del medio físico del área de estudio.....	14
Relieve.....	15
Provincias fisiográficas presentes en la zona Maya de Quintana Roo.....	16
Geología.....	17
Edafología.....	17
Vegetación:.....	17
Clima:.....	18
b) Problemática. Abasto de agua y sequía.....	19
c) Estado del arte.....	23
4. Análisis de las variables hidrológicas de la zona	26
a) Precipitación.....	26
b) Evaporación, temperatura e insolación	29
5. Hidrología en la geología cárstica.....	32
a) Caracterización de los suelos	34
b) Unidades de paisaje: atillos, bajos, corrientales, sabanas, aguadas, huamiles y zonas con pérdida de cobertura vegetal.....	39
c) Escurrimiento superficial.....	41
d) Humedad del suelo.....	46
6. Obras y prácticas de retención para el almacenamiento de agua.....	50
a) Obras en la cuenca: Gaviones, cabeceos de cárcava y medidas no estructurales	50
b) Bordos o presas, jagüeyes y cisternas.....	57
Jagüeyes.....	57
Presas de valle.....	61
Presas de contorno	62

Presas de silla	63
Cisternas	64
c) Funcionamientos de vaso	65
a) Diseño y dimensionamiento de vertedores	68
7. Análisis agrícola (agua en el suelo)	75
a) Infiltración	76
b) Evapotranspiración	76
Método de Thornthwaite	78
Método de Blaney Cridle:	79
c) Riego: Simulación de cultivos	81
8. Anteproyecto y análisis de indicadores económicos	87
a) Beneficios y costos	87
9. Conclusiones	89
Recomendaciones:	91
10. Bibliografía	92
Apéndice 1	93
Precipitación y evaporación	93
Apéndice 2	101
Funcionamientos de vaso (cisternas, jagüeyes y bordos)	101
Apéndice 3	111
Precipitación efectiva. Número "N"	111
Apéndice 4	114
Simulación de cultivos (método de Flinn)	114

1. Introducción

La siguiente investigación pretende generar un plan de acción para aprovechar el escurrimiento en exceso durante las épocas de mayor precipitación del año en cualquier tipo de cuenca, de tal manera que se maximice el tiempo que la humedad es retenida en el suelo, en los recursos biológicos, en cuerpos de agua (naturales y artificiales) y en el ambiente en general, reteniendo volúmenes de agua suficiente para el desarrollo agrícola y abasto humano. Utilizar el volumen excedente para riegos oportunos en los cultivos, con el fin de aumentar los rendimientos y generar competitividad en el mercado, además de favorecer el arraigo de las familias campesinas. Para el caso específico de la investigación se estudiará la hidrología de la zona Maya de Quintana Roo y se aplicará en el caso específico de cuencas del ejido El Naranjal.

A partir de medidas estructurales y prácticas forestales a diferentes escalas se busca hidratar el paisaje para maximizar los efectos benéficos del agua de lluvia en el entorno, regenerar el desempeño hidrológico de las unidades del paisaje, facilitar la disponibilidad y disminuir el estrés hídrico. Así, se busca tener mayor humedad en el suelo durante el año y disminuir los tiempos de concentración del escurrimiento superficial, de tal manera que escurra más agua durante el año en los cauces, con el fin de conservar los suelos a partir de buenas prácticas de manejo, y así lograr aprovechar dichos volúmenes en exceso.

Para conocer el balance hídrico y las fracciones de agua que son retenidas en los diferentes tipos de suelo, recursos biológicos, escurrimientos superficiales y en la percolación; se realiza un análisis hidrológico utilizando modelos de parámetros concentrados para así determinar los volúmenes de escurrimiento directo y gasto máximo en tormentas extraordinarias. Empleando modelos empíricos se determina el uso consuntivo de los campos agrícolas, además, se realiza una modelación de las variaciones de la humedad en el suelo durante el ciclo vegetativo de un cultivo en específico. También se hace un minucioso análisis de los datos de estaciones climáticas dentro de la vecindad para determinar con exactitud el comportamiento de las variables a lo largo de las series de tiempo.

Utilizando herramientas de cartografía, fotogrametría, recorridos de campo, análisis de laboratorio para los suelos y cartografía social se conocen las características fisiográficas de la zona, se determina el potencial del área agrícola y se logran ubicar las obras de retención y de almacenamiento de agua.

Para la realización de un plan de este tipo, se plantean tanto medidas estructurales —ubicación y dimensionamiento de gaviones y cabeceos de cárcavas, presas de tierra compactada y jagüeyes— como no estructurales —acomodo de necromasa en zonas de ladera y zanjas con pendiente controlada. Las obras de almacenamiento de agua se proyectan como jagüeyes (ollas de agua) y bordos de tierra, se ubican en puntos clave del terreno en donde la pendiente cambia y la forma del terreno lo vuelve propicio siguiendo la teoría del **Key Line** (Punto Clave), además, se requiere que los sitios cuenten con potencial de escurrimiento alto y se ubiquen en zonas con mayor altitud que los campos agrícolas. Estos bordos se construyen con membranas de arcilla compacta o con membranas de polietileno, y generalmente, debido a la forma del terreno, sus dimensiones oscilan entre 0.5 y 3.0 ha de espejo de agua y proveen un almacenamiento de entre 10,000 y 60,000 m³. Los jagüeyes se excavan en terrenos arcillosos y sus dimensiones y forma dependen más de un diseño que de la topografía del terreno natural, como es el caso de los bordos, además el corte de tierra provee la arcilla que se utilizan para conformar las membranas impermeables del vaso y el núcleo impermeable del bordo. Utilizando la información topografía se conoce la forma de los vasos de almacenamiento de agua para construir las curvas de elevación-capacidad; tomando en cuenta los volúmenes de escurrimiento y evaporación mensual de cada vaso se calcula su funcionamiento y se determina el aprovechamiento de cada uno. Otra función de los almacenamientos de agua es utilizarlo como medida de protección contra incendios.

El plan también involucra determinar las necesidades de agua de cada cultivo a partir de la realización de modelos numéricos, y así se determinan las dosis de riego, los tiempos de infiltración, los volúmenes de agua totales y se propone una política de riego. Se utiliza el modelo de Flinn para determinar las necesidades de agua de los cultivos, así como el método de Blaney-Cridle para determinar la evapotranspiración mensual.

En el entendido de que existen otros modelos para cuantificar las necesidades de agua de las plantas, se utilizan los modelos mencionados por ser los más comunes en México.

Conociendo las necesidades de agua para que los cultivos se desarrollen satisfactoriamente se realiza el balance entre la necesidad y la disponibilidad en los cuerpos de agua superficiales para observar la viabilidad de la ejecución del plan en el contexto del desarrollo agrícola. Con el objetivo de transformar los trabajos agrícolas de subsistencia y autoconsumo a un aprovechamiento agrícola productivo y tecnificado.

Durante el año 2013 tuve la fortuna de participar junto con el Taller Nuevos Territorio y el Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C. en el proyecto del Diseño Hidrológico Comunitario para seis ejidos de la región de la zona Maya de Quintana Roo. En donde se realizaron talleres y recorridos con la comunidad, se elaboró la cartografía de la zona, propuesta de ubicación de bordos y obras de retención de suelo, levantamientos topográficos y finalmente el análisis hidrológico de las microcuencas. Durante 10 meses en la región, logré acopiar información para el desarrollo del plan propuesto, al igual que una mejor

comprensión del proceso hidrológico de la zona y los procesos productivos (agricultura, ganadería, apicultura, aprovechamientos forestales, entre otros).



Figura 1-1 Recorrido de levantamiento de información



Figura 1-2 Corriental típico de la zona Maya

2. Plan de retención de agua en el paisaje rural

El objetivo es generar un plan de acción colectivo en torno al recurso hídrico y su proceso en el ambiente, que maximice los efectos benéficos de este recurso en el entorno, y regenere el desempeño hidrológico de las unidades del paisaje. Este plan se enfoca en la intervención del medio campesino a diferentes escalas para almacenar la mayor cantidad de agua posible, facilitar su disponibilidad y así generar oportunidades de desarrollo y arraigo para las familias campesinas.

Las oportunidades de almacenamiento de agua en el paisaje rural se encuentran en:

- Suelo: es la manera más económica de almacenar agua en grandes cantidades y con disponibilidad para las plantas.
- Recursos biológicos (organismos vivos): es el elemento que más agua de lluvia almacena y consume y se presenta en diferentes formas disponibles para el ser humano (frutas, plantas).
- Almacenamientos superficiales (presas, jagüeyes y cuerpos naturales de agua): Proporciona agua con buena calidad, fácil disponibilidad a mediano costo.
- Cisternas (de ferrocemento, plástico o concreto): muy buena calidad del agua, pero es muy costoso.

Estos almacenamientos están presentados en orden de mayor a menor cantidad de agua potencialmente almacenada, y también de menor a mayor costo de implementación por volumen de agua almacenado. Por lo que podemos concluir que el almacenamiento en los suelos y la diversificación de la cobertura vegetal de los predios campesinos promueve un mayor almacenamiento de agua en el paisaje mientras que aumenta la productividad de la tierra y es la opción más económica para regenerar el desempeño hidrológico del paisaje. Mientras que el almacenamiento en cisternas es la opción más costosa, pero, que mantiene el agua de una mejor calidad y disponibilidad para el consumo humano y es la más apropiada para captar el agua de lluvia cerca de los hogares.

Las acciones para el almacenamiento en los suelos se centran en la disminución de la velocidad de escurrimiento del agua, en la infiltración y en el aumento de carbono orgánico en los suelos donde se llevan a cabo actividades de producción primaria y de regeneración de la funcionalidad ecológica del paisaje con enfoques de alta productividad social.

Los recursos biológicos representan un elemento transicional entre el agua almacenada en el suelo y la posibilidad de usar esa agua en los sistemas campesinos de producción y sustento. A través de relaciones ecológicas entre los diferentes elementos vivos del sistema del suelo y las plantas, el agua almacenada en los suelos se vuelve disponible en los tejidos vivos, microbianos, fúngicos, vegetales y posteriormente en los animales. Así, gran parte del agua disponible en los sistemas naturales y consecuentemente en los sistemas de producción campesina, se encuentra en las plantas y animales que lo componen y su manejo es fundamental en el establecimiento del debido ciclo hidrológico de estos sistemas de producción y sustento.

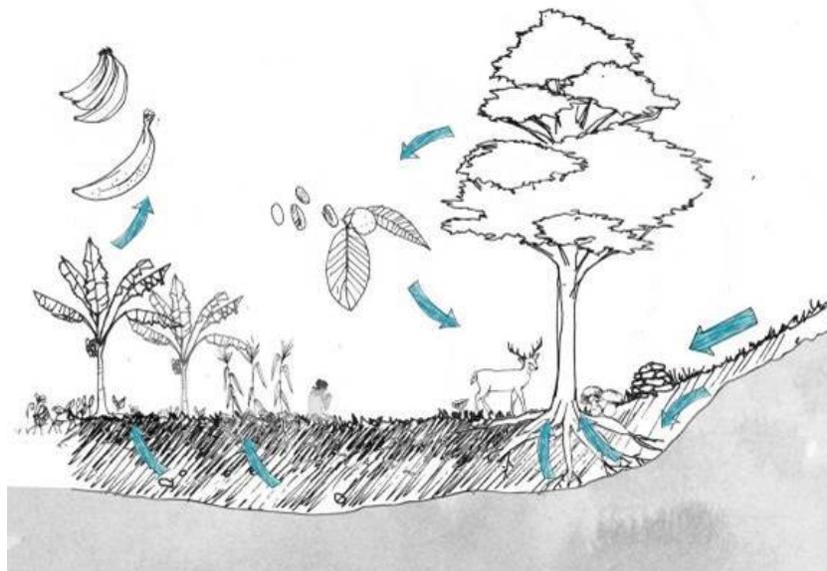


Figura 2-1 Almacenamiento de agua en el suelo y los recursos biológicos

A partir de un minucioso análisis de las oportunidades y debilidades hidrológicas de una cuenca o varias microcuencas que converge en un territorio, se genera un plan de acción. Como resultado, el territorio contará con el dimensionamiento de cisternas y áreas de captación de agua lluvia para consumo en las viviendas, el diseño de una red de cuerpos de agua para el abasto de los sistemas agrícolas de sustento y medida de protección contra incendios, la implementación de obras de cabeceo de cárcavas y una serie de estrategias enfocadas en mejorar la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos agrícolas a través de buenas prácticas de agricultura campesina, la zonificación para la implementación de obras para evitar pérdida de suelo y estimular la infiltración de agua: construcción de retranques de piedra zampeada, alineado de piedras en franjas a contorno y el acomodo de necromasa en las zonas de recarga y escurrimiento para promover la infiltración. Estas acciones brindarán una mayor permanencia de humedad en el suelo a lo largo del año y mejores rendimientos de los cultivos.

Tabla 2-1 Obras de almacenamiento de agua en el ejido El Naranjal

Paraje	Obra	Tipo de obra	Área de captación	Potencial de almacenamiento	Accesibilidad	Beneficiarios	Seleccionados por el Ejido
			ha	m ³			
Soh Ak'al	Aguada	Restauración	2,687	280,828	fácil		
Aguada Guadalupe	Aguada	Restauración	818	85,520	fácil	15	
Mecanizado bajo	jagüey	Escavación	3,024	316,035	fácil	80	
Mecanizado alto	jagüey	Escavación	910	95,045	fácil	80	
Entrada Noh Naranjal	jagüey	Escavación	632	66,070	fácil	10	
Aguada Escondida	Bordo	Bordo de valle	464	48,453	fácil	20	
Aguada Escondida	Aguada	Bordo de valle	188	19,639	fácil	20	↗
UAIM	Bordo	Bordo de valle	1,085	113,354	fácil	40	↗
Tierra colorada alto	Bordo	Bordo de valle	1,164	121,628	fácil	40	↗
Tierra colorada bajo	jagüey	excavado	2,247	234,802	fácil	35	↗
Bordo del Mecanizado	Bordo	Bordo de valle	426	44,533	mediana	80	↗
Olla de Guadalupe	Bordo	Bordo de Silla	138	14,426	mediana	15	↗
A. Wüiro	Aguada	Retranques	706	73,743	fácil	80	↗

Plan de acción: El proceso se plantea como un diseño participativo con la población del territorio, a partir de una serie de talleres y recorridos con la comunidad, por otro lado, el análisis hidrológico y cartográfico de las microcuencas y una revisión bibliográfica, se diseñan y ubican las obras que formarán parte del plan. Se toma como premisa atender las zonas cercanas al área de trabajo de los campesinos (agricultura, ganadería y apicultura).

Además se fomentan entre los campesinos prácticas agrícolas que impulsan la regeneración de los suelos y favorecen el buen drenaje de las parcelas.

Muchas de las obras y prácticas propuestas en el Plan tienen un impacto en el ambiente a largo plazo, cuyos resultados serán visibles en algunos años, quizá lustros; sin embargo, los campesinos, al contar con agua para realizar riegos estratégicos, se beneficiarán con la mejora en los rendimientos a los primeros años. Es por ello, que en esa investigación se evalúa el Plan desde el punto de vista del aumento de la productividad agrícola en función de la nueva capacidad de riego.

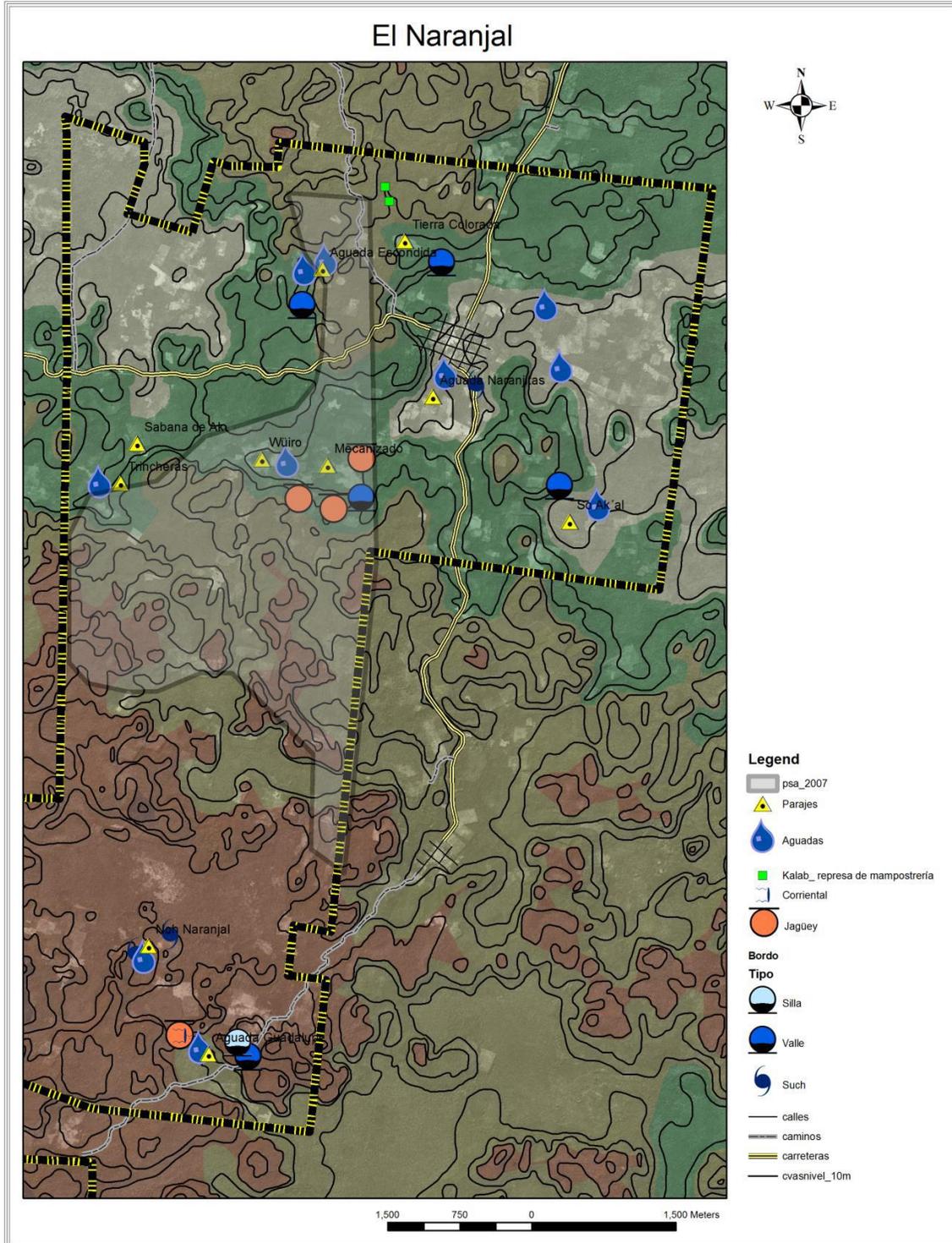


Figura 2-2 Plan de ubicación de cuerpos de agua y bordos propuestos. Es el polígono del ejido Naranjal con las ortofotos y el modelo digital de elevación y curvas de nivel a cada 10 m. El sombreado gris se refiere al área destinada a pagos por servicios ambientales (PSA)

3. Zona Maya de Quintana Roo, caso de estudio: El Naranja

a) Inventario del medio físico del área de estudio

Esta zona del país se distingue por ser una extensa región cárstica en la que se desarrolló en buena parte la cultura Maya. Ambas características la convierten en una zona única que aporta elementos de gran importancia tanto a la diversidad biológica como a la cultural de México y el mundo.

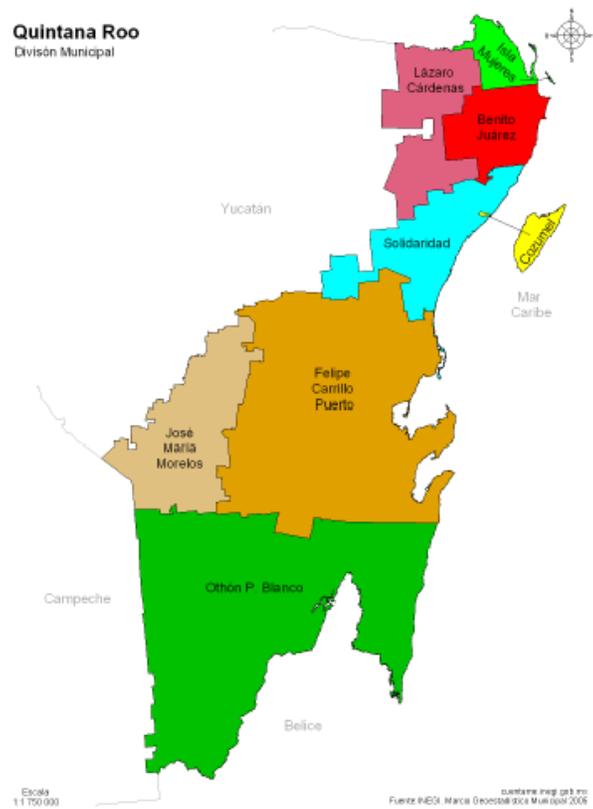


Figura 3-1 División política del Estado de Quintana Roo



Figura 3-2 Mapa de la península de Yucatán con las Cuencas y subcuencas.

La Península de Yucatán se localiza en el Sureste de la República Mexicana ($19^{\circ}40' - 21^{\circ}37'N$, $87^{\circ}30'$ y $-90^{\circ}26'E$), con una superficie aproximada de 140,000 Km² (Citado en Estrada *et al*, 2014).

Conformada por tres estados, administrativamente, Campeche está constituido en 11 municipios, Quintana Roo en 10, y Yucatán con 106. La información hidrológica y de calidad del agua es integrada en regiones nombradas en los años 60, como regiones hidrológicas RH30, RH31, RH32 y RH33 (Estrada *et al*, 2014) y se presentan en la Figura 4.1.

Relieve

Este elemento geográfico determina otros elementos como suelos, agua, vegetación, etc. La Península de Yucatán es una provincia fisiográfica con características muy diferentes al resto de la república mexicana, debido a la historia geológica que ha definido el territorio actual durante el neógeno y el cuaternario. La morfología de la Península de Yucatán es de grandes planicies estructurales y lomeríos que superan los 350 m al sur (Figura 4.2), y otras formas

de relieve como planicies inclinadas, onduladas y escalonadas de geometría diversa (Lugo, 1999).

Según el INEGI (2002), la Península de Yucatán se formó por sedimentación calcárea, encontrándose cubierta por un mar de poca profundidad, que emergió poco a poco, unos centímetros cada siglo, adquiriendo una forma de relieve llana o plana, con escasa elevación sobre el nivel del mar y una ligera inclinación general de sus pendientes que no sobrepasan los 20 grados (Figura 4.3).

Provincias fisiográficas presentes en la zona Maya de Quintana Roo

Según Duch (1991), las zonas fisiográficas son unidades territoriales que dividen una subprovincia fisiográfica, atendiendo a los distintos patrones específicos de asociación, que muestran los variados tipos de topofomas, considerando su forma, tamaño y predominancia en la asociación. En base a las particularidades del terreno, este autor, propone la subdivisión de la Península de Yucatán en 5 provincias fisiográficas y 21 zonas fisiográficas (Figura 4.5). La zona de estudio se encuentra, principalmente, dentro de dos provincias fisiográficas

III. Llanuras cársticas Quintanarroenses, que abarcan principalmente el norte y centro del estado de Quintana Roo con pequeñas inclusiones al estado de Yucatán. La superficie del terreno es casi completamente plana, con una muy ligera inclinación hacia la costa del mar Caribe.

IV. Llanuras costeras del Caribe, constituye la menor de las subprovincias fisiográficas y ocupa la esquina suroriental del estado de Quintana Roo, en colindancia con la república de Belice. El relieve está definido por terrenos bajos y planos con ligeras ondulaciones debidas a pequeños promontorios. Su principal rasgo es la presencia de numerosas lagunas que se encuentran aparentemente conectadas entre sí.

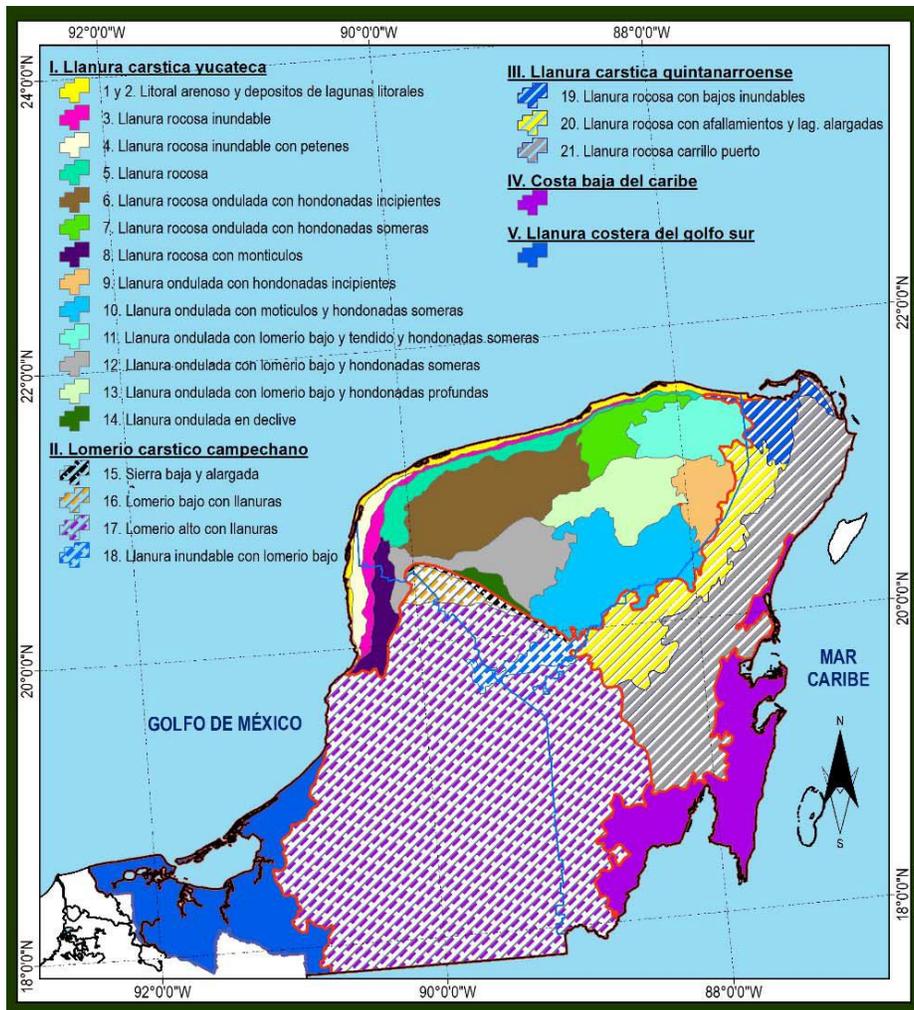


Figura 3-3 Provincias fisiográficas presentes en la península de Yucatán

Geología

La Península de Yucatán es una estructura geológica que corresponde a una plataforma (un conjunto de rocas sedimentarias), con un grosor de más de 3,500 metros, que descansan sobre un basamento paleozoico. La constitución geológica de la superficie de la Península es en su totalidad de rocas sedimentarias marinas (calizas y derivadas), las edades abarcan del Paleoceno, al Cuaternario.

Edafología

Las asociaciones de suelo con mayor extensión son: Leptosoles 67.94% (Rendzinas + Litosoles), en zonas cársticas recientes y juveniles; Gleysoles 15.25%, en zonas costeras, Luvisoles 4.40%, en planicies cársticas maduras; Vertisoles 2.99%, al Sur y Noreste; Solonchak 2.42% en la costa; Regosol (2.29%) e Histosol (0.58%), en litoral y planicie costera (Figura 4.7).

Vegetación:

Considerando la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (Enriqueta, 1988), el clima que predomina en la REPSRAM es de tipo Aw2

(i), caracterizado por un clima cálido sub húmedo que prevalece en la región que condiciona alta humedad. Miranda y Hernández X. (1963), describen 10 tipos de vegetación para la Península de Yucatán, estando particularmente presentes en la zona de la REPSEAM las selvas medianas subperennifolias, las zonas de selvas bajas llamadas localmente “Ak’ alche”, las sabanas o “Chak an”, las zonas de labranza o cultivos y los huamiles.

Considerando estas clasificaciones y en un ensayo por entender la distribución de la vegetación se realizó una fotointerpretación con ortofotos digitales (Febrero de 2000, y resolución de 2 metros), escala 1:20 000 y con la imagen SPOT 2010; a su vez el trabajo desarrollado por ejidatarios en mapas comunitarios facilitó la comprensión del territorio para agrupar de una manera general la vegetación y el uso del suelo a una escala 1:10, 000. Como resultado se obtuvieron tres grupos importantes:

- Selvas medianas subperennifolias: conformada por árboles de gran envergadura y alturas que llegan a superar los 30 metros, denominada en algunos lugares de la región como “Monte Alto”.
- Selvas bajas: No se especifica una característica en particular esperando que para posteriores estudios y con un mejor entendimiento en campo, determinar si corresponde a una selva inundable o a una selva espinosa. También es importante señalar que localmente a esta vegetación se le da el nombre de Ak’ alches debido a su intrínseca relación que tiene con los suelos del mismo nombre.
- Sabanas: localmente conocidas como “Chak an”, son áreas con pastizales naturales y gramíneas, susceptibles a quemarse y juegan un papel importante junto con las “Aguadas, por abastecer de agua en época de secas a la fauna silvestre y a la población en general, a su vez se encontró que después de una sábana la siguiente conformación de vegetación corresponde a una selva baja.
- Huamiles: Son las áreas que se encuentran en un proceso de transición o recuperación. El proceso transicional entre un polígono intervenido o alterado (normalmente quemado) con fines agrícolas o ganaderos que ha sido abandonado y de forma natural recobra su cobertura de forma lenta y desordenada. Existen diferentes niveles de transición o madurez del huamil.

Clima

Según Orellana et al., 2009, el clima, al igual que el estado del tiempo, está integrado por factores como la latitud, altitud, orografía, continentalidad, circulación de la atmósfera y corrientes marinas. Los elementos que más se usan para caracterizar el clima son la temperatura media y la precipitación. Otras dos variables que complementan el comportamiento de la temperatura y que también proporcionan información relevante del clima, son la temperatura máxima extrema y la temperatura mínima extrema anual.

Los vientos principales son los “alisios”; vientos moderados que llegan al Sureste a Este. En el invierno son comunes los norestes, vientos provenientes de NNE-N.

Estos vientos fríos traen lluvias y pueden alcanzar velocidades de tormentas. Durante el tiempo de lluvias pueden aparecer ráfagas con velocidades de hasta 100 kilómetros.

La observación de las características de la temperatura media y la precipitación, durante los últimos años, es precisamente lo que ha llevado a pensar que se está presentando un calentamiento a nivel global (Orellana et al., 2009). La región tiene una temperatura media anual de 26°C, y de acuerdo con Magrin et al., (2007), para la zona Maya (Quintana Roo, Campeche, Chiapas, Tabasco y Yucatán en México, y los países Centroamericanos de Belice, Guatemala, Honduras y El Salvador) se predice un incremento en la temperatura promedio de 2 al 3.5°C para el 2090.

Algunos de los efectos del cambio climático se traducirán en cambios en la distribución de las precipitaciones y en la ocurrencia e intensidad de los huracanes y las sequías. Las proyecciones para la Península de Yucatán reportan una reducción de precipitación anual del 10 al 15% y más del 30% durante la estación seca y lluviosa con respecto al promedio del periodo 1980-1999 (Barcena et al., 2010). Esta disminución en la precipitación podría provocar el aumento de periodos intensos de sequía, disminución en la productividad de las actividades agropecuarias con una consecuente reducción en la producción de alimentos, así como una mayor frecuencia de incendios forestales (Galindo, 2007).

Una característica climática que gobierna la estacionalidad de la precipitación pluvial es la Corriente Tropical y la Corriente del Noroeste; la primera formada por masas calientes y húmedas, procedentes del Caribe y del Atlántico Norte, causantes principales de las lluvias estivales. La corriente del noroeste está formada por distintas corrientes, pero las que tienen influencia en la región proceden de la masa continental de los Estados Unidos y Canadá, que en general son calientes y secas en estío, frías y relativamente húmedas, en invierno. Estas últimas son las que producen los “Nortes” (Contreras, 1958), los cuales son causantes de la precipitación que se presenta de noviembre a enero en la Península de Yucatán. Estas corrientes (tropical y del noroeste) rigen la variación en la cantidad de lluvia que cae anualmente en toda la Península, unos años por exceso y otros por ausencia, provocando como resultados altibajos en las actividades agropecuarias (Mendoza y Ku, 2010). Para entender la precipitación en la Península de Yucatán es importante tener presente: 1) que existe un marcado gradiente barométrico desde la zona de altas presiones del Atlántico hacia las bajas presiones. La condición anticiclónica provoca sequía. 2) Al no existir marcada orografía en la región, las masas de aire cargadas no precipitan de manera frontal. 3) Sin embargo, el ascenso por calentamiento de estas masas de aire, seguido por enfriamiento adiabático y posterior descenso con precipitación, son fenómenos muy comunes denominados lluvias convectivas (Balam et al., 1999).

b) Problemática. Abasto de agua y sequía

En cada sitio del mundo el ciclo hidrológico tiene características particulares como la magnitud, escala, ocurrencia y eficiencia, por lo tanto, la disponibilidad de agua para el ser humano varía en cada zona. Por ello, las sociedades han moldeado el

paisaje que los rodea, siendo el agua el eje principal de estas modificaciones del entorno. A lo largo de la historia, las poblaciones han transformado el proceso del aprovechamiento del ciclo hidrológico sustancialmente, sin embargo, no siempre ha sido benéfico para el ambiente, en especial, dentro del territorio rural, que necesita del agua de lluvia para producir alimentos y subsistir.

En México, y en Latinoamérica en general, existe el grave problema de desabasto de agua en zonas rurales, aunado a un constante cambio de uso de suelo que deteriora las zonas de amortiguamiento ecológico; y graves casos de pérdida de suelo. En conjunto, los tres implican una mala productividad agrícola y muchas veces situaciones de inundación aguas abajo, lo que conlleva a complejos problemas sociales. Una eficaz intervención estructural y no estructural en el paisaje, es necesaria para crear un plan de mitigación ante escenarios de pobreza.

Dentro de todo el territorio mexicano existen poblaciones dedicadas al aprovechamiento del campo en diferentes escalas, formas de trabajo o niveles de tecnificación, sin embargo, los parámetros que más rigen los niveles de productividad son las variables climáticas, y el agua desempeña un papel fundamental. Los volúmenes de producción, así como el rendimiento de los cultivos, normalmente están regidos por la cantidad de lluvia y la humedad del suelo. Al existir dicho escenario, la conservación del suelo es fundamental para el aprovechamiento agrícola, sobre todo en los suelos con alto contenido de carbono que aportan más humedad al suelo y fertilidad. Trabajar las diferentes zonas de la cuenca es esencial para un buen desempeño hidrológico y agrícola, en donde el arrastre de sedimentos finos sea mínimo.

La península de Yucatán es la región septentrional de Mesoamérica comprendida entre Guatemala, Belice y los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo en México. Es la segunda región de selva subperennifolia más grande de América después del Amazonas. Se conforma de una geología kárstica con suelos superficiales muy delgados asentados sobre roca caliza fracturada, lo que hace que sea una zona de fragilidad ante los cambios externos. La región se encuentra amenazada por la entrada de ciclones tropicales y no cuenta con elevaciones geográficas grandes para dar protección de los vientos y tormentas. En muchas zonas los suelos no son lo suficientemente profundos para que la agricultura se desarrolle de manera eficaz. Aunado a estas características, las malas prácticas agrícolas y un mal manejo de las selvas y bosques han incrementado y acelerado la erosión de los suelos.

Tomando en cuenta los cambios en los patrones del clima y buscando resolver las necesidades de agua para el consumo humano, la producción animal y la agricultura, además de evitar la pérdida de suelo, se elaboró El Plan de Hidratación del Paisaje Rural, una herramienta de hidratación del paisaje para aumentar la capacidad de almacenamiento de agua en las unidades del paisaje con el fin de maximizar los efectos benéficos del recurso y restablecer la funcionalidad de la hidrología y sus elementos. Sirviendo, simultáneamente, como medida de mitigación ante escenarios de cambio climático.

En términos de abastecimiento de agua en la península de Yucatán, a diciembre de 2011, se tenían registradas 160 zonas de veda para la extracción de agua subterránea, decretadas o acordadas durante el periodo de 1948 a 2007. (INEGI).

El agua subterránea presenta altos contenidos de carbonato de calcio y un PH básico; en la zona se reportan múltiples casos de personas con cálculos renales y problemas de vesícula asociados a la calidad del agua. Otra consecuencia ligada a la calidad de agua subterránea es el mal funcionamiento de las líneas de conducción de agua potable, y un caso muy notorio es el taponeo de mangueras de riego por goteo en las zonas tecnificadas debido a las incrustaciones de calcio. Por ello, resulta una apuesta muy riesgosa el intentar hacer grandes aprovechamientos agrícolas en zonas que no cuentan con el suelo propicio, la disponibilidad hídrica suficiente, ni la calidad de agua adecuada.

En cuanto a los volúmenes disponibles en la Península de Yucatán, en el aspecto superficial se cuenta con un volumen escurrido medio anual del orden de los 3,133 millones de m³, en las porciones suroeste (Río Candelaria), oeste (Río Champotón) y sureste (Río Escondido), de los cuales únicamente se utiliza el 1% del total. En lo referente al recurso hidráulico subterráneo, se cuenta con una recarga total que alcanza un volumen anual cercano a los 25,310 millones de m³, de los que una vez descontadas las extracciones y las descargas para mantener el equilibrio del sistema, se estima disponer con un volumen anual calculado de 7,969 millones de m³ (PMPMS)

Tabla 3-1 Disponibilidad de agua en la península de Yucatán

Unidad hidrogeológica	Recarga total	Descarga natural comprometida	Volumen concesionado	Disponibilidad
Península de Yucatán	21,813.40	14,542.20	3,388.38	3,882.82
Cerros y valles	1,194.20	854.90	7.11	332.18
Xpujil	2,094.40	1,784.10	2.21	313.09
Isla de Cozumel	208.70	160.40	15.94	32.35
Total	25,310.70	17,341.60	3,413.64	4,560.44

Nota: Cifras en Hm³/año. Fuente: DOF, 2013a.

Por otro lado, la disponibilidad natural media per cápita, es de para el año 2000 fue de 4,771 m³, la cual en México ha venido disminuyendo debido principalmente al crecimiento poblacional, ya que para el año 1950 era de 18,035 m³ por habitante por año. (CONAGUA, 2012a). Quintana Roo, es un caso evidente de esta situación, donde el crecimiento poblacional en las décadas de los sesenta y setenta fue muy alto debido a los sucesos históricos y de migración.

Además de la explotación del acuífero, otros tipos de fuentes de extracción de agua son los ríos, lagunas, aguadas y cenotes. Este recurso es relativamente accesible en la mayor parte de los municipios de los tres estados, por lo que una buena porción del aprovechamiento que se realiza no se registra en datos oficiales. En zonas más aisladas, el hecho de aprovechar los pozos de extracción resulta un grave problema por los costes eléctricos y técnicos que representa.

Según datos publicados por la CONAGUA en el Atlas del Agua en México 2014, en la Península de Yucatán no existe ninguna presa para el almacenamiento. Existen aprovechamientos directos de cuerpos de agua superficiales de los ríos de la Península de Yucatán como Candelaria, Champotón, Mamantel, y Palizada, en el estado de Campeche (Bautista-Zúñiga., 2003).

En la zona de estudio, y en general en las zonas rurales, los pobladores no reconocen a la erosión como un proceso permanente y crítico, que además se acelera por los sistemas de producción que aplican. Sin embargo, es un problema evidente y presente a diversas escalas. En los sistemas de producción agrícola, la erosión está vinculada a la práctica de la quema de la cobertura de las parcelas. Después del fuego, los suelos quedan expuestos y además inertes en sus primeros centímetros de profundidad lo que elimina la cohesión biológica y destruye la textura, dejando el suelo superficial a merced de las gotas de lluvia, las cuales lo arrastran hacia las zonas más bajas del paisaje. Los sistemas ganaderos también son sujetos a quemas en la época de secas para promover el rebrote de los pastos, pero esto genera situaciones muy parecidas a la descrita anteriormente.

Durante los meses de junio a octubre se presentan continuamente depresiones tropicales y ciclones, ya que la Península se encuentra cerca de 4 regiones matrices de huracanes; el golfo de Tehuantepec, la sonda de Campeche, el Caribe oriental y la región atlántica (INEGI, 2002).

Las regiones que padecen sequías sufren fuertes pérdidas económicas y favorecen la migración de gran parte de su fuerza de trabajo hacia otras zonas, afectan grandes extensiones de terreno de cultivo y pueden provocar la muerte de numerosas cabezas de ganado. Disminuyen la disponibilidad de agua para la producción industrial y pueden afectar el uso doméstico de los habitantes (García et al., 2007). Históricamente se ha comprobado que es el fenómeno meteorológico que mayor daño económico causa a la humanidad (Cody et al., 1998). La **Sequía** se puede definir como el “lapso caracterizado por un prolongado y anormal déficit de humedad” (Campos, 1996).

Documentado por García et al., 2007, en marzo de 1998, en Campeche más de 6,500 familias sufren la falta total del agua; en abril de **1998**, en Campeche, Tabasco y Yucatán, se declara la peor sequía desde hace 20 años, con más de 290,000 hectáreas de pastizales y 51,000 hectáreas de maíz, frijol y sorgo afectadas, además de que se dejaron de producir 63,000 litros de leche y 1,800 toneladas de carne. En junio de ese mismo año, se reportan pérdidas más de 5,000 hectáreas de pastizales y maíz, y la muerte semanal de 20,000 aves de corral.

Los datos oficiales reportan que el sector más afectado por la sequía es el agropecuario y de acuerdo con esta información nacional del 2000 al 2010, las peores sequías han sido la de 2005 y la del 2009, en donde se registró la mayor cantidad de productores afectados y áreas de cultivo dañadas (CENAPRED, 2012). El monto total de daños registrados del 2000 al 2010 asciende a \$577,969 millones de pesos, equivalentes a 2,716,367 hectáreas dañadas de cultivos y pastizales y 563,291 productores afectados, en este mismo periodo (CENAPRED, 2012).

Los periodos de sequías siempre han estado presentes en la vida de los pobladores de la zona Maya (Mendoza et al., 2007). Esto está registrado en los libros del Chilam Balam donde se menciona la frecuencia de sequías y sus efectos como hambrunas, migraciones, guerras y demás catástrofes (Me-Bara et al., 2003). Gill (2008) menciona que la cultura Maya hubiera seguido funcionando con todas sus predicciones intactas sino se hubieran presentado sequías severas que

causaron una mortalidad masiva. De acuerdo a Márdero et al., (2012), la Península de Yucatán actualmente está catalogada como una de las cinco zonas del país con sequía severa (región noreste) y con sequía fuerte (zona sur). Quintana Roo y Campeche son de los estados más vulnerables a la sequía meteorológica donde más del 75% de su territorio se ve afectado.

c) Estado del arte

El año 2012, en el estado de Quintana Roo, se conformó una Red de Ejidos Productores de Servicios Ambientales “Ya’Ax Sot’ Ot’ Yook’ol Kaab” A.C. (REPSERAM). La Red está compuesta por 35 ejidos y comprende un área de 252,213 hectáreas en dos municipios del estado de Quintana Roo, es decir, 32 ejidos de municipio de José María Morelos y 3 ejidos del municipio de Felipe Carrillo Puerto. Esta organización representa uno de los mayores esfuerzos por gestionar de manera sostenible el territorio que los comprende. Esto incluye buscar mejores rutas o canales de comercialización de sus productos agrícolas y forestales, competencia justa, reducir el intermediarismo, permitiendo reintegrar los beneficios que los paisajes rurales ofrecen tanto a nivel local como regional y global.

La REPSERAM trabaja desde distintas líneas de acción, esto incluye el trabajo colaborativo con organismos como el Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C. (CCMSS), quienes desde hace varios años son una plataforma que desarrolla proyectos para ayudar a los bosques y apoyar a las comunidades rurales dueñas de ellos.

En estos años, el CCMSS ha entretendido una relación de trabajo y colaboración con comunidades y ejidos, y con organizaciones de segundo nivel de varias regiones del país, con el objeto de fortalecer las capacidades de la población local para gestionar los territorios de que son dueños. Además, el Consejo Civil juega un papel relevante en los espacios de diálogo sociedad-gobierno buscando incidir en el diseño e implementación de las políticas públicas hacia regiones forestales. Actualmente, el Consejo Civil preside el Comité Técnico Consultivo REDD.

En conjunto, REPSERAM-CCMSS, solicitaron para 6 de los 35 ejidos de la Red, el desarrollo del proyecto Diseño Hidrológico Comunitario (DHC), implementado con anterioridad y de manera exitosa por el Taller Nuevos Territorios (TNT) en otros sitios del país que presentaban una problemática semejante, del cual se desprende el Plan de Aprovechamiento del Escurrimiento Superficial Para Cultivos, presentado en esta investigación. El ejido El Naranjal (caso de estudio), cuenta con una población de 500 habitantes y es parte de la REPSERAM, está integrado por 148 ejidatarios legalmente reconocidos y es propietario de 8,553 hectáreas.

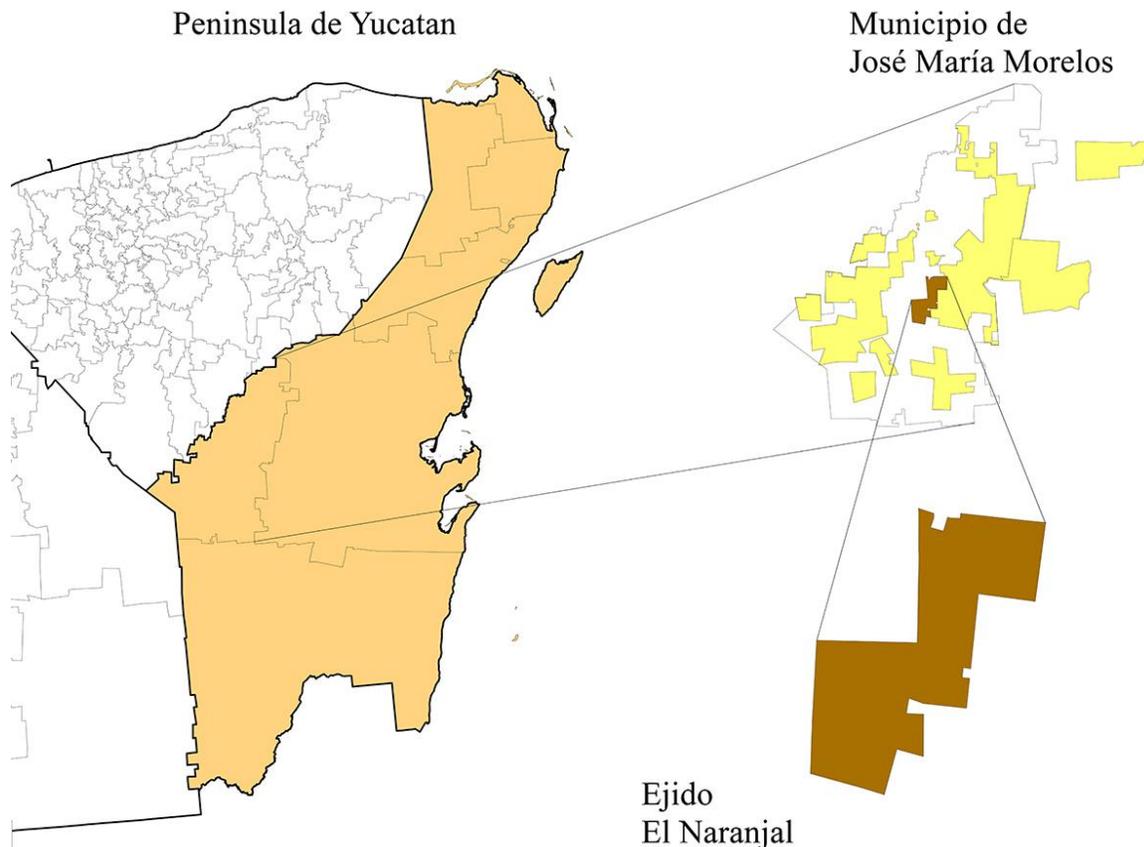


Figura 3-4 Mapa de localización de la zona Maya de Quintana Roo. En amarillo se observan los polígonos de los Ejidos, El Naranjal es un ejido con los elementos característicos de la hidrología local.

Además de estas organizaciones, otras instituciones como la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) y el Programa Nacional contra la sequía (PRONACOSE) han elaborado estudios e informes donde se proponen estrategias de mitigación al problema, como el Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación del Consejo de Cuenca Península de Yucatán (PMPMS), documento que aporta datos esenciales para esta investigación.

En cuanto a acciones y medidas de mitigación de la sequía, el PMPMS menciona que existen jagüeyes naturales, pero, actualmente hay comunidades que construyen jagüeyes artificiales como medios para captar, almacenar y administrar agua de lluvia con diferentes fines. La organización Fondos para la paz, a través del fondo Kelloggs, realizó la construcción de un jagüey comunitario a cielo abierto de 2.40 m de profundidad aproximadamente, y una hectárea de extensión, con geomembrana, debidamente cercado y con conexión para la extracción del agua para la localidad de la Virgencita de la Candelaria, y la construcción de 157 cisternas en el municipio de Calakmul.

El único ejemplo de embalses superficiales de gran tamaño, es el de PRONATURA, quienes realizaron de 2008-2012 un embalse artificial para la captación de agua de lluvia, en la comunidad de Xpujil, Campeche, las dimensiones aproximadas de esta obra fueron de 20,000 m² X 1 m de alto; el agua

abastece parcialmente las necesidades de una población de 500 personas a través de un acueducto (PRONATURA, 2013, citado en PMPMS).

La situación actual en la Península de Yucatán respecto a la infraestructura de irrigación para actividades agrícolas es la siguientes: cuenta con dos distritos de riego agrícola, el 048 (Ticul) y el 102 (Río Hondo) de los cuales, el 048 da atención a 8 municipios en una superficie de 8, 616 ha y beneficia a 4,749 usuarios. El distrito de riego Río Hondo atiende a un municipio con 8,527 ha y beneficia a 1,317 usuarios. Referente a las unidades de riego hay alrededor de 4,078 de las cuales 666, 595 y 2,817 corresponden a Campeche, Quintana Roo y Yucatán respectivamente (IMTA, 2011, citado en PMPMS).

Otro esfuerzo para combatir la problemática es la creación de los distritos de desarrollo rural, que son zonas con características ecológicas y socioeconómicas homogéneas para la actividad agropecuaria, forestal, acuícola y agroindustrial, bajo condiciones de riego, de drenaje, de temporal y de acuacultura, con el objeto de planear, fomentar y promover el desarrollo rural integral. También, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) cuenta con una red de estaciones agroclimatológicas provista de sensores para medir la temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, humedad del follaje, punto de rocío, radiación solar y velocidad y dirección del viento.

Así, es evidente que se han implementado acciones por parte de diversos actores, desde múltiples enfoques y disciplinas, para atender y resolver la problemática inherente a esta zona geográfica, como es el desabasto de agua y sus consecuencias en el ámbito agrícola. El Plan se inserta dentro de estas acciones.

4. Análisis de las variables hidrológicas de la zona

Actualmente, existen diferentes métodos para la obtención de series de datos de variables climáticas como la precipitación, la evaporación, la temperatura y la humedad en el suelo, a diferentes escalas y con series de tiempo definidas. En México, los registros más largos de las variables climáticas son los que se han medido en las estaciones meteorológicas y climáticas del país, son accesibles a partir del sistema CLICOM de la CONAGUA y son los datos oficiales para el desarrollo de análisis climáticos.

Otros medios para la obtención de datos hidrometeorológicos son los proporcionados por las misiones de la NASA, que desde hace más de 15 años han registrado y puesto a disposición pública datos de precipitación y humedad del suelo en todo el mundo, una de las misiones es la TRMM, que proporciona datos a una resolución de 0. 25°, con celdas de menos de 5km² que actualmente facilitan un resultado a tiempo real cada 3 horas. Además es posible manipular los datos históricos y generar las estimaciones hidrológicas. Otros productos de dichas misiones son valores de la humedad del suelo en cualquier parte del mundo y con resolución de 5 km².

Para el caso, se utilizan los datos de las estaciones climatológicas de CONAGUA dentro del área de influencia de la zona en investigar, el Ejido Naranjal. Debido a que son las series de tiempo más largas que se tienen para el desarrollo de los funcionamientos de vaso, la estimación de las lluvias a diferentes periodos de retorno y los análisis agrícolas. Por otro lado, los datos de las misiones de la NASA se encuentran a una resolución muy grande y las cuencas de estudio son muy pequeñas, así que la información generada tendría demasiada interferencia en la calidad de los datos. Sólo se utilizarían las series de una celda para toda la región. Es probable que en poco tiempo la resolución de dichos productos mejore y sea de gran utilidad para proyectos de esta escala.

a) Precipitación

La intensidad de la precipitación puede tener algún efecto sobre la cantidad de agua consumida o empleada durante cualquier periodo de siembra. Puede presentarse como una serie de lloviznas ligeras y lluvias más frecuentes durante el verano. Las lluvias, dependiendo la intensidad, pueden agregar humedad al suelo y las plantas usarla a través de la transpiración.

La humedad aportada por la lluvia puede perderse grandemente por evaporación directamente de la superficie del follaje de la planta (lluvia interceptada) y del suelo. Al igual, en tormentas de mayor intensidad el suelo saturado no tendrá mayor capacidad de retención y el agua puede perderse por escurrimiento superficial. Se pueden emplear diferentes condiciones de clima, suelo y cultivo.

El clima de la región es cálido subhúmedo con régimen de lluvias en verano. Las precipitaciones oscilan entre los 1,000 y 1,300 milímetros. Y con una humedad relativa del 85%. En el rango altitudinal se encuentra en los 50 y 100 m. sobre el nivel del mar. Las variaciones en la precipitación ocasionan la aparición de dos subtipos de clima cálido subhúmedo con lluvias en verano para el municipio de José María Morelos, uno más húmedo hacia el oriente y otro menos húmedo en la porción occidental (región donde se ubica El Naranjal) de la superficie municipal. Predominan los vientos del este y sureste.

Usando la posición geográfica del asentamiento humano del ejido y la de las estaciones climatológicas de la región, se aplicó la metodología de los polígonos de Thiessen para seleccionar la más relevante para el análisis. Esta metodología identificó a la estación Adolfo López Mateos, número 23044, como la más apropiada para los cálculos hidrológicos. La estación tiene un periodo amplio de registros, del año 1971 al año 2012, lo cual nos permite generar una mayor certidumbre en el análisis de los datos.

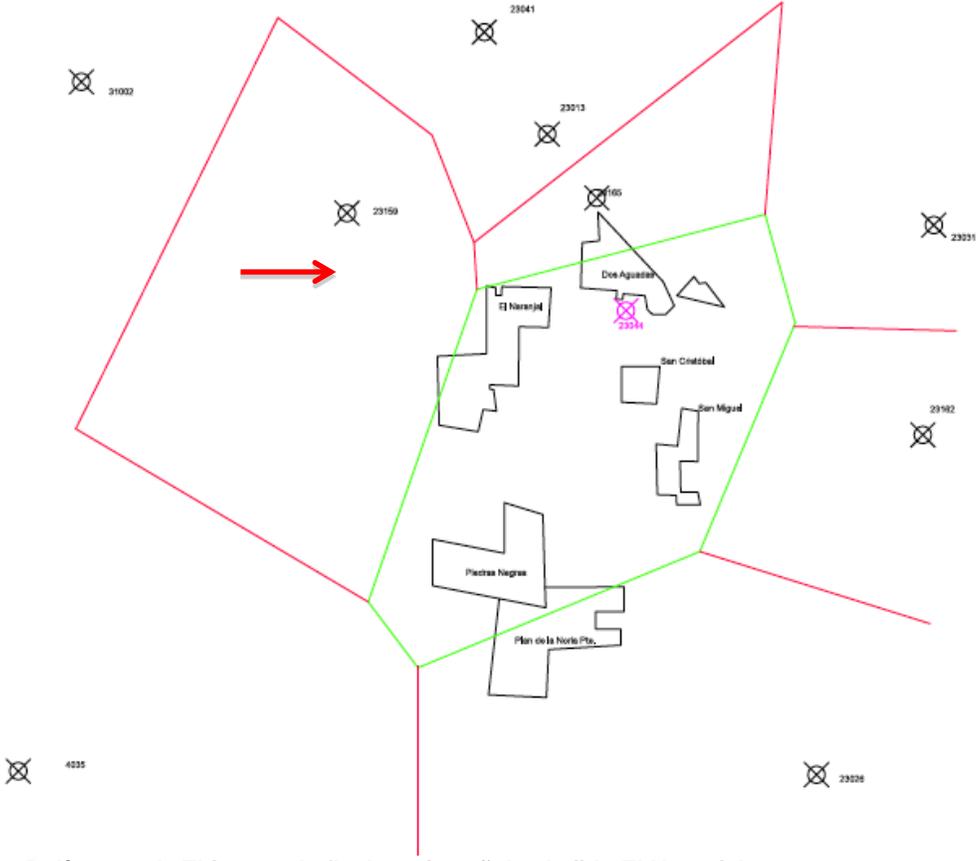


Figura 4-1 Polígonos de Thiessen, la flecha roja señala el ejido El Naranjal



Figura 4-2 Estación 23044 Adolfo López Mateos, José María Morelos, Quintana Roo.

Una vez definida la estación se reunieron los datos proporcionados por la CONAGUA para determinar los datos climáticos relevantes para el análisis hidrológico.

Tabla 4-1 Datos climatológicos, estación Adolfo López Mateos, 23044

Clave	Promedio		
Estación	23044 Adolfo López Mateos, José María Morelos		
	Precipitación [mm]		
Mes	Normal	Máxima mensual	Máxima diaria
Enero	66.9	193	104
Febrero	24.8	128.6	40
Marzo	59.3	184	119
Abril	48.5	155	75
Mayo	112	281	95
Junio	152	271	97
Julio	157.1	267	76
Agosto	200.4	400.5	118
Septiembre	198.3	519.4	95
Octubre	148.2	485	230
Noviembre	104.1	234	90
Diciembre	54.5	158.9	70
Anual	1,326.10		

Se utilizan series de tiempo con diferentes escalas (día, mes o año) para el análisis de transformación de lluvia a escurrimiento que se aplicará en los capítulos referentes a los cálculos del funcionamiento de vaso y el análisis agrícola.

En primer lugar se observó la serie de precipitación diaria y se identificaron los datos faltantes. Es común que las estaciones climáticas no cuenten con toda la

información y se tengan datos faltantes o con incongruencias. En el caso de la estación 23044 se encontró que la serie únicamente tenía dos años faltantes 1981 y 1982, dichos años fueron revisados en las estaciones vecinas y se completó la serie interpolando con el método de regresión lineal.

Para el caso de los funcionamientos de vaso se utilizó una serie media mensual para determinar los volúmenes medios de entrada a los cuerpos de agua como se analiza en el capítulo 6. Para el análisis agrícola (capítulo 7) se utilizan tres series de datos de lluvia diaria en los días del ciclo vegetativo (invierno-primavera y primavera-verano); una serie con los valores de lluvias medias diarias, otro con las lluvias del 2005, año del intenso huracán Wilma, categoría 5, y la serie de tiempo de 1998 por ser una de las peores sequías como se dijo en el capítulo 3. Apéndice I

b) Evaporación, temperatura e insolación

La evaporación en el ciclo hidrológico es el fenómeno mediante el cual el agua cambia de estado líquido a gas, esto al ser retenida por las hojas, así como la que existe en la superficie del suelo. En muchas localidades existen zonas de suelos húmedos en los que la capa freática se halla muy próxima a la superficie. En estos casos la evaporación del suelo es casi igual a la de una superficie libre de agua, mientras que con niveles freáticos más profundos la evaporación disminuye hasta eliminarse, cuando la humedad no llega a alcanzar la superficie del suelo por la acción de la capilaridad.

El Inegi, a partir de la medición constante y distribuida en la región determinó que existe una evaporación media anual de 2069 mm, sin embargo, debido al método experimental empleado para obtener estos datos, dicha evaporación se refiere únicamente a la lámina evaporada en un volumen y una superficie libre de agua determinada. Sin embargo, estos representan únicamente valores promedio para todo el municipio que no resultan de utilidad por su escala (nivel municipal), para mejorar la precisión de la información (nivel ejido) se realizó un cálculo propio de la evaporación media mensual y anual del El Naranjal (1525.3 mm). Ver tablas en el Apéndice 1.

Para el análisis de las cuencas de El Naranjal, al igual que para la obtención de los datos de precipitación, se utilizó la misma estación climática (23044) y las mismas series de tiempo, empleando los valores de evaporación diaria para el análisis agrícola y los valores mensuales para el funcionamiento de vaso. Además, para efecto de los cálculos de captación y del funcionamiento de los cuerpos de agua, se tomaron los valores de la evaporación ajustada. Esta fue obtenida al multiplicar los valores de evaporación por un factor igual a 0.75 (Tabla 7). El valor fue tomado por experiencias anteriores que aplican el mismo valor en climas calurosos. Es el ajuste necesario para datos de evaporímetros clase A de EEUU como los que se utilizan en México.

Tabla 4-2 Datos de evaporación y evaporación ajustada

Estación	Evaporación	Evaporación ajustada
23044 Adolfo López Mateos, José María Morelos	[mm]	[mm]
Mes	Normal	
Enero	100.5	75.4
Febrero	114.2	85.7
Marzo	161.8	121.4
Abril	180.1	135.1
Mayo	188.1	141.1
Junio	153.4	115.1
Julio	153.3	115.0
Agosto	152.8	114.6
Septiembre	127.3	95.5
Octubre	118.8	89.1
Noviembre	102.3	76.7
Diciembre	97.6	73.2
Anual	1650.2	

Si fuera necesario ajustar los valores de evaporación a las condiciones locales del municipio de José María Morelos, se pueden aplicar diversos métodos, el más común es registrando los valores de la presión de vaporización en los evaporímetros y en los cuerpos de agua en estudio. O en su caso, realizar modelos de cuerpos de agua con superficies mayores a 20 m², realizar los registros pertinentes y realizar los cálculos de ajustes.

Las temperaturas medias anuales en la región varían entre los 25°C, y los 26°C. Para el cálculo de la evapotranspiración se utilizaron los datos de temperatura media mensual registrados en la misma estación climática. Es el factor que más interviene en los valores del uso consuntivo del agua durante el año en cualquier localidad, ya que, es una buena medida de la radiación solar y finalmente del desarrollo de las plantas. Se presenta una tabla con los valores de temperaturas.

Tabla 4-3 Valores de temperaturas medias mensuales

Temperatura			
Mes	Máxima	Media	Mínima
Enero	30.60	21.6	12.0
Febrero	33.10	22.6	12.5
Marzo	35.80	24.2	14.0
Abril	36.30	26.3	14.5
Mayo	46.00	27.1	9.5
Junio	36.40	27.1	19.5
Julio	35.90	26.8	18.7
Agosto	36.4	26.8	18.4
Septiembre	34.7	26.7	18.5
Octubre	34.0	25.4	17.1
Noviembre	32.7	23.7	15.0
Diciembre	31.6	22.4	13.0
Anual		25.1	

La insolación o el por ciento de las horas de luz es una de las variables más importantes que alteran el uso consuntivo del agua. Dependen exclusivamente de la posición de la Tierra, es decir, de la latitud donde se encuentre. Debido al movimiento de la Tierra y a la inclinación del eje de la misma, la duración del día durante el verano es mayor en las latitudes boreales que en el Ecuador ya que el sol es la fuente de toda la energía empleada en el desarrollo de los cultivos y en la evapotranspiración del agua, esta duración permite a las plantas el continuar transpirando por un periodo mayor durante cada día, lo que produce un efecto similar la prolongación del periodo de crecimiento.

El Naranjal se encuentra en la latitud 19.75 Norte, por lo tanto el porcentaje de horas de luz promedio a cada mes es la siguiente:

Tabla 4-4 Valores de por cientos de horas luz promedios mensuales

Latitud	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
17	7.86	7.32	8.43	8.48	9.04	8.87	9.11	8.87	8.27	8.22	7.69	7.8
17.75	7.8225	7.295	8.4425	3.505	9.1025	8.9325	9.1725	8.9075	8.27	8.2075	7.6525	7.725
18	7.83	7.3	8.44	4.5	9.09	8.92	9.16	8.9	8.27	8.21	7.66	7.74

5. Hidrología en la geología cárstica

Aunque la mayor parte de la Península de Yucatán no cuenta con variaciones de nivel considerables, el municipio de José María Morelos y Felipe Carrillo Puerto en Quintana Roo, posee zonas de serranías pequeñas, donde se produce una gran cantidad de escurrimiento superficial con el siguiente proceso:

Al caer la lluvia, la mayor parte será interceptada por la vegetación y poca agua llegará al suelo, gran parte del territorio son selvas, aunque existen grades zonas de barbechos y zonas de huamil poco avanzado en donde existe menos intercepción de agua por la vegetación. Visto desde la parte alta, el agua que llega al suelo se almacena en sus espacios porosos y de manera temporal en la zona sub superficial del suelo, llamada *atillos*, (suelos arcillosos y con gran capacidad de retención); al saturarse el suelo y elevarse los niveles de inundación, comienza a escurrir por la red de cauces (*corrientales*) hasta las pequeñas lagunas denominadas *aguadas*, que forman una red de vasos que trabajan en sistema interconectado y muchas veces se unen convirtiéndose en un único vaso de retención de agua; en las partes más bajas existen grandes sabanas de inundación, que abarcan varios kilómetros cuadrados. Dichas sabanas, al llegar a cierto nivel se drenan al subsuelo por cavernas llamadas *xuch*. En la figura 3 se muestra el proceso descrito de derecha a izquierda.

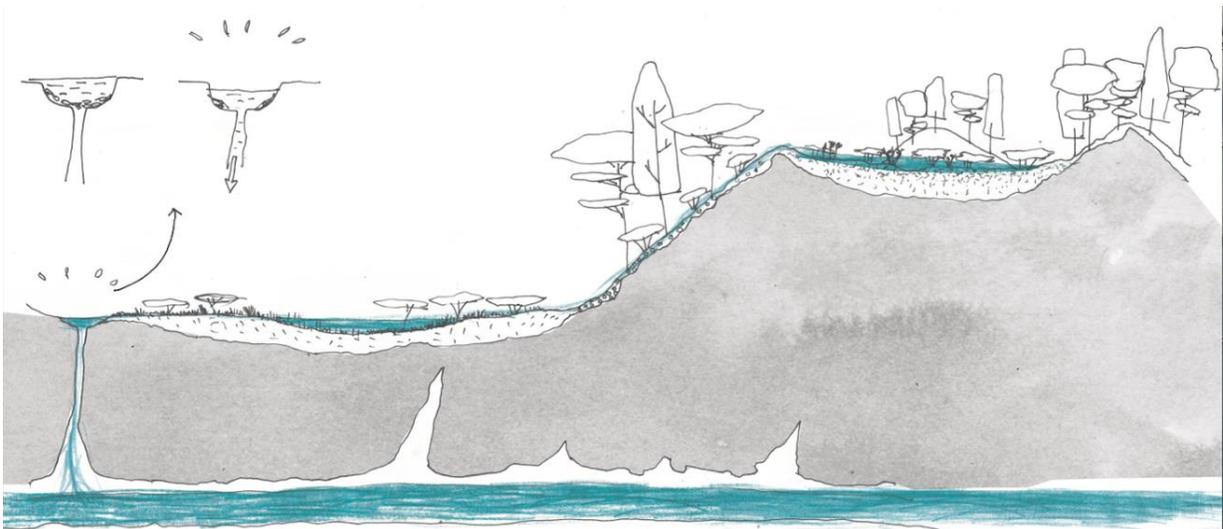


Tabla 5-1 Corte de un perfil típico del paisaje y su funcionamiento hidrológico, al lado izquierdo se puede ver la ubicación de los xuch en el paisaje.

A lo largo de toda la región se observa el mismo proceso, a diferentes escalas, pero con los mismos elementos. Las poblaciones han buscado la manera de hacer

productiva la tierra y sacar el mejor provecho de sus nutrientes, sin embargo, por ser suelos tan delgados, las parcelas tienen una vida útil de producción de menos de 4 años, en consecuencia, el ciclo tradicional de “tumba – roza – quema” se ha repetido de manera exhaustiva, generando cambios en gran parte de la cobertura del suelo.

Una característica que es de notar, es la ausencia de corrientes superficiales en la península de Yucatán, por lo cual el agua de la lluvia se evapora, es absorbida por las plantas, el suelo y se infiltra en el subsuelo. La cuenca Yucatán, es la que ocupa la mayor parte del estado, con una extensión que representa casi el 90% del territorio estatal, limita al norte con el Golfo de México, al este con el Estado de Quintana Roo, al sur con la Región Hidrológica 33 y al oeste con el estado de Campeche y el Golfo de México (INEGI, 2002). En la Figura 4.17, se puede notar que la Península de Yucatán carece de corrientes superficiales en la porción norte; hacia el sur, solo se manifiesta un drenaje incipiente que desaparece en resumideros o en cuerpos de agua superficiales o aguadas (Bautista et al., 2005). Según el Anuario Estadístico de Campeche (INEGI, 2012a), esa entidad cuenta con 50 corrientes de agua y 28 cuerpos de agua. El Anuario Estadístico de Quintana Roo (INEGI, 2011b), reporta 10 corrientes de agua y 6 cuerpos de agua (19 lagunas y 1 estero), y para Yucatán, se reporta ausencia total de corrientes superficiales y 6 cuerpos de agua (4 esteros y 2 lagunas) (INEGI, 2010c).

Dentro de los parámetros fisiográficos de una cuenca existe la densidad de drenaje, la cuenca de Quintana Roo posee menos de $0.5\text{km}/\text{km}^2$, por lo que se considera con un drenaje pobre, es decir posee muy pocos kilómetros de ríos por extensión. Por lo tanto la velocidad del escurrimiento en general es muy baja, creándose estas grandes planicies de inundación (sabanas) que son drenadas en muchos casos por las cavernas subterráneas de manera súbita. Es por esto que el buen funcionamiento de los corrientales y las aguadas es fundamental para el proceso

La totalidad del flujo hidrológico es subterráneo y presenta un acuífero formado de rocas calizas en las épocas del Terciario y Cuaternario, con permeabilidad alta en la mayor parte del estado y permeabilidad baja en el área norte en la franja costera. Después de alcanzar el acuífero, el agua se mueve hacia la costa donde descarga en el mar (Villasuso y Méndez, 2000), como se muestra en la Figura 10. Los niveles del agua se aproximan a los 120 m de profundidad en la región de lomeríos, 30 m en las planicies y hasta menos de 5 m en una franja paralela a la costa de 5 km (IMTA, 2011).p.33

Este manto freático presenta variaciones en la calidad del agua en forma estratificada. La parte superior de este manto está contaminado por pozos someros, mal diseñados, que han sido utilizados como sumideros para drenaje pluvial y para descargas residuales clandestinas, lo que ha ocasionado que la explotación y el uso del acuífero se realice entre los 20 y los 40 metros donde hay agua dulce de buena calidad (INEGI, 2002).

En la región de cerros y valles podemos encontrar agua de buena calidad, mientras que el agua de la zonas costera y cuencas escalonadas es de regular calidad. Finalmente, en muchas otras áreas, podemos encontrar aguas cálcico-sulfatadas, las cuales son de mala calidad.

No obstante, a pesar de que el acuífero recibe abundante recarga su aprovechamiento intensivo está restringido por el riesgo que implica el deterioro de la calidad del agua y la presencia de la cuña de agua marina, es decir, la filtración de agua de mar a los acuíferos continentales.



Figura 5-1 Drenaje subterráneo de la Península de Yucatán. (CONAGUA)

a) Caracterización de los suelos

El suelo es la parte superficial de la corteza terrestre, está conformada por material mineral, materia orgánica, agua y aire. Se forma a partir del intemperismo que actúa en la roca basal, ya sea a partir de la acción de fuerzas físicas o químicas actuando a lo largo de los años y de forma natural. El suelo se deposita y acumula formando capas de suelo llamadas horizontes y finalmente el conjunto de capas constituye el perfil del suelo. Tomando en cuenta el tiempo que el suelo tarda en formarse; se considera que es un recurso no renovable. Favorablemente con la ayuda de técnicas y herramientas del hombre, es posible regenerar zonas con pérdida de suelo.

Además, contiene una población microbiológica activa y muchos organismos grandes, como las lombrices de tierra, que tienen efectos importantes sobre sus características químicas y físicas y el crecimiento de las raíces

La textura del suelo es la relación entre los diferentes tamaños o dimensiones de las partículas. Está definida a partir de la proporción de arena, limo y arcilla que contenga un suelo en su parte mineral, es decir por la fracción de diferentes tamaños de partícula (de 2 a 0.002 mm). Si en un análisis granulométrico se determina que predominan las arenas, será un suelo arenoso y con textura gruesa, con poca o nula capacidad de cohesión; Si las arcillas predominan será un suelo arcilloso y con textura fina, mayor capacidad de retención de agua y capacidad de cohesión. Los suelos francos son aquellos tienen textura media, con cantidades análogas de partículas de arcilla, limo y arena.

Dependiendo del origen y formación de un suelo, la parte mineral será de alrededor del 50% del volumen. La textura del suelo es la característica más importante para definir la cantidad que puede agua y nutrientes que puede almacenar.

La estructura del suelo se define como la forma en la que las partículas minerales están agrupadas en una forma estable en conjunto con el agua y el aire, se llama estructura del suelo.

De manera natural, las condiciones que contribuyen a la formación de la estructura de un suelo son las variaciones en: temperatura (sequías y heladas), la humedad, la temperatura del mismo suelo, movimientos o deslizamientos de tierra y la combinación de éstas.

Tipos de estructuras son los granulares (muy arenosos o rocosos), columnares (se desarrollan comúnmente cuando existe erosión fuerte), también es muy común encontrar suelos amorfos, donde simplemente no forman estructuras.

En suelos arcillosos, la granulación del suelo se produce principalmente a partir de la acción de agua en conjunto con los coloides. El óxido de hierro es comúnmente el coloide más efectivo en producir la agregación en los suelos donde el contenido de materia orgánica y la actividad microbiana es baja, por el contrario, el ion sodio (Na^+) es el principal causante de la desintegración de la granulación, lo que provoca en el caso de los suelos arcillosos, que estos se vuelvan casi impermeables.

La estructura del suelo es capaz de modificar la influencia de la textura del suelo en diferentes procesos; la relación de la humedad y aire, disponibilidad de nutrientes para las plantas, actividad microbiana, desarrollo de la raíz y la velocidad de infiltración del agua en el perfil del suelo. El suelo contiene generalmente múltiples organismos vivientes tales como bacterias, hongos, algas, protozoos, insectos y animalillos pequeños que afectan directa o indirectamente a la estructura del suelo y el crecimiento de las plantas.

La zona en estudio forma parte de una gran región biocultural perteneciente a la cultura Maya. Esta cuestión implica el abordar y comprender una serie de elementos cultura de apropiación tal como es el caso de la clasificación Maya de suelos la cual integra conocimiento local sobre vegetación, humedad, pedregosidad, relieve, profundidad del suelo, color, textura, entre otros más, que en sí mismo guarda una concepción de paisaje. Particularmente en la REPSEAM se conocen principalmente los siguientes tipos de suelos: Box lu' um, Ya'ax hom-Ak'alche, K'an Kab lu' um y Ka Kabb Lu'um y Pus lu' um.

Por lo tanto la relación entre el suelo y el agua es muy diferente según el tipo de suelo y la unidad del paisaje de la que se habla. La retención de agua en el suelo así como las curvas de tensión se pretenden ajustar con próximos estudios más específicos. Por ahora se eligen parámetros generales de coeficiente de escurrimiento C_e , número N y conductividad hidráulica K .

Con el fin de realizar los cálculos del método racional para determinar el gasto o el volumen de agua que escurre en una determinada cuenca pequeña (menos de 1km^2), se realiza una caracterización de los suelos que la comprenden.

Para caracterizar los suelos, primeramente, es necesario definir un coeficiente de esorrentía, que se refiere al porcentaje del volumen de agua precipitada que escurre en un área determinada. Está directamente relacionado con el tipo de

vegetación o cobertura y el tipo de suelo, además de la densidad de los bosques, el tipo de tratamiento a la tierra (en el caso de las parcelas) y la precipitación media anual. Esta interacción entre la textura del suelo y la cobertura vegetal determinan el coeficiente de escorrentía, según las tablas propuestas por el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). Así, suelos de textura gruesa y cobertura forestal escurren menos agua que suelos de textura fina y cobertura de pastos. Y superficies de suelo escurren menos agua que áreas cubiertas con techos o pavimentos.

El valor de K se refiere al valor de la constante de escorrentía y el coeficiente de escorrentía (Ce) es el porcentaje de escurrimiento directo. Ce, depende de K y del valor de precipitación media anual. Los valores de K se obtuvieron a partir de tablas que proponen el IMTA y el INE (Instituto Nacional de Ecología), el valor depende del tipo de suelo, cobertura y tratamiento de la cobertura o pavimento del suelo en el caso de caminos o zonas urbanas. Para el cálculo del coeficiente de escorrentía (Ce) se emplean las siguientes expresiones:

$$Ce = (K * (P - 250) / 2000) + (K - 0.15) / 1.5 \quad \text{si } K > 0.15 \quad \dots 5.1$$

$$Ce = (K * (P - 250) / 2000) \quad \text{si } K \leq 0.15 \quad \dots 5.2$$

Siendo P la precipitación media anual, en mm.

Tabla 5-2 Valores de K para diferentes suelos y porcentaje de densidad de los bosques

Cobertura del bosque	Tipo de suelo		
	A	B	C
Más del 75 %	0.07	0.16	0.24
Entre 50–75%	0.12	0.22	0.26
Entre 25-50 %	0.17	0.26	0.28
Menos del 25%	0.22	0.28	0.3

Suelo A: Suelos permeables (arenas profundas y loes poco compactos).

Suelo B: Suelos medianamente permeables (arenas de mediana profundidad, loes y migajón).

Suelo C: Suelos casi impermeables (arenas o loes delgados sobre capa impermeable, arcillas).

Tabla 5-3 Criterio de densificación de bosques

Densidad de bosque	Cobertura
> 190 m ³ /ha	Más del 75 %
100-190 m ³ /ha	Entre 50–75%
35-100 m ³ /ha	Entre 25-50 %
< 35 m ³	Menos del 25%

Sistema Aguada Naranjal

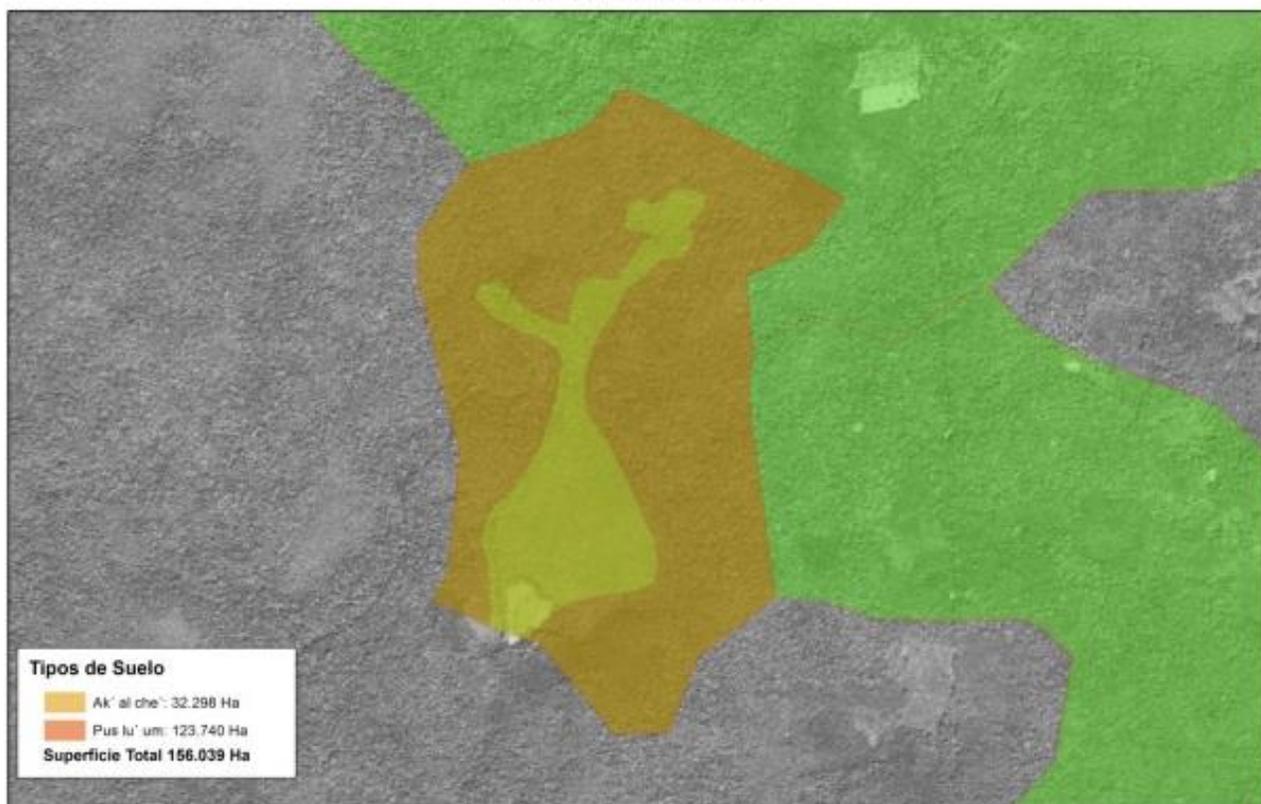


Figura 5-2 Cobertura de suelo y áreas para la microcuenca de la Aguada El Naranjal. Se observa la ortofoto de INEGI que se tomó de base para determinar el uso de suelo.

Coeficiente de escorrentía de las cuencas de El Naranjal

El coeficiente de escorrentía se determinó considerando los tipos de suelo y cobertura vegetal. Se utilizaron ortofotos e imágenes satelitales para la definición precisa de los tipos de cobertura vegetal, además se realizaron recorridos de campo y pruebas de textura del suelo. Se encontraron 7 tipos de suelo con diferentes texturas y características. A continuación se presenta una tabla resumen.

Tabla 5-4 Caracterización de los suelos Mayas

Tipo de suelo	Textura	Color	capacidad de retención de agua	profundidad	Unidad del paisaje	Agricultura	FAO	Taxonomy
Ak'alche	franco arcilloso	rojizo oscuro	muy alta	de 3 a 7 m	Bajos y aguadas	medianamente bueno	Gh (Gleysol/húmico)	Av
Ya`ax hom	arcillo /arenoso	café	alta	de 3 a 7m	Monte alto	malo	Lo (Luvisol/ortico)	Av
K'an kab lu`um	arcillo arenoso	rojizo claro	alta	de 3 a 5 m	altillos	bueno	Lv (Luvisol/vértico)	Cht
Pus lu`um	limo /arenoso	negro	baja	de 1 a 3 m	altillos	muy bueno	Cv (Cambisol/vértico)	Upv
Tzek`el	franco arenoso	gris	muy baja	de 1 a 3 m	Sabanas	malo	R (Rendzina)	Upv
Box lu`um	franco arcilloso	negro	Alta	de 1 a 3 m	Disperso	malo	R (Rendzina)	Upv
Ka kabb lu`um	franco arcilloso	café	Media	de 3 a 7m	Disperso	malo	R (Rendzina)	Upv

Para el cálculo del proceso de lluvia a escurrimiento se tomaron como base dos tipos de suelo (uno arcilloso y otro arenoso), las áreas de caminos y de zanja. Para dividir las zonas de manera que se pueden observar las coberturas de manera general en las ortofotos.

Tabla 5-5 Coeficientes de escorrentía para las microcuencas de la zona

Suelo	K	Ce
Ak'alche	0.24	0.19
Pus`lum	0.16	0.09
Camino	0.90	0.70
Zanja	1.02	1.12

De manera general se presentan los valores de escurrimiento mensual en una hectárea por cada tipo de suelo utilizando el valor de la lluvia media.

Tabla 5-6 Potencial de escurrimiento de agua por tipo de suelo al mes. Además de la evaporación en un embalse por hectárea

	Ak'alche	Pus'um	Evaporación en un embalse
Mes	m ³ /ha	m ³ /ha	m ³ /ha
Enero	126.5	62.1	773.9
Febrero	46.9	23.0	879.3
Marzo	112.2	55.0	1245.9
Abril	91.7	45.0	1386.8
Mayo	211.8	103.9	1448.4
Junio	287.5	141.0	1181.2
Julio	297.1	145.7	1180.4
Agosto	379.0	185.9	1176.6
Septiembre	375.0	183.9	980.2
Octubre	280.3	137.5	914.8
Noviembre	196.9	96.6	787.7
Diciembre	103.1	50.6	751.5
Total	2508.1	1230.0	12706.5

b) Unidades de paisaje: altillos, bajos, corrientales, sabanas, aguadas, huamiles y zonas con pérdida de cobertura vegetal.

Las cuencas de la Península de Yucatán se pueden dividir en diferentes unidades de paisaje, dependiendo de la asociación de suelos, vegetación y geomorfología. Cada una con una función en el desempeño hidrológico.

Las zonas de recarga de la cuenca (**altillos**), se refieren a planicies altas en el perfil del paisaje con suelos arcillosos, conocidos en la clasificación Maya de suelo como ak' al che', y una vegetación de selva baja inundable, caracterizada por tener un alto porcentaje de epifitas. Las zonas de escurrimiento o lomeríos, caracterizadas por tener pendientes y arroyos temporales, conocidos localmente como **corrientales**, tienen un tipo de suelo franco arcilloso y pedregoso, nombrados en la clasificación Maya de suelos como pus lu' um, y vegetación de selva mediana subperennifolia.

Los **corrientales** son arroyos temporales que forman la conexión de las zonas altas de recarga y las zonas de **sabanas** (descritas en el capítulo 3) donde el agua finalmente drena a los ríos subterráneos a través de los **xuch**. Los xuch son fracturas en la estructura geológica, que a través de la presión generada por el agua acumulada en las sabanas y la presión negativa ejercida por los volúmenes episódicos de agua que fluyen por los drenajes subterráneos, estallan sus tapones orgánicos resultados de la acumulación de materia orgánica que fue arrastrada por el flujo del agua en temporadas de lluvia anteriores.

Las **aguadas** son depresiones naturales o hechas por las personas, donde se acumula el agua que escurre por el perfil del paisaje o que se acumula en los bajos antes de drenarse por los xuch. Las aguadas fueron parte fundamental de la estrategia de los antiguos mayas para el manejo del agua en el paisaje, complementaban redes de canales de desviación y drenaje, represas de control, terrazas y montículos para la producción agrícola y el manejo de los bajos inundables, además de fundamentales para la cacería y extracción de recursos típicos de estos ecosistemas. Para suplir las necesidades de consumo, estas eran complementadas con los aljibes o chultunob' para el almacenamiento de agua de consumo humano. Estas estructuras podían ser impermeabilizadas con una capa de arcilla o terminadas con una capa de piedra labrada que garantizaba el almacenamiento del agua para las épocas más secas del año.



Figura 5-3 Vista general de una aguada. Se observa la problemática de la falta de capacidad debido al azolve y arrastre de material orgánico.



Figura 5-4 Entrada de agua a un Chultun en antiguo asentamiento Maya del ejido San Cristóbal.

Betty Berenice Faust, en su libro “El Desarrollo Rural en México y la Serpiente Emplumada: tecnología y cosmología Maya en la selva tropical de Campeche.” (FCE, 2010), describe como el manejo de estas estructuras de almacenamiento y sus estructuras asociadas de conducción y drenaje, fue base de la organización social de muchos de los pueblos mayas que habitaban la región, hasta que comenzó el establecimiento de pozos profundos y sistemas entubados de distribución de agua en la década de los 60’s. Por esta razón, las aguadas encontradas en el ejido necesitan ser restauradas y rediseñadas, pues se han ido acumulando sedimentos y su capacidad de almacenamiento se ha reducido. Incluso, como es el caso de la aguada Lirios, en algunos casos se han convertido en pequeños charcos que antes constituían espejos de agua temporales, como es el caso de la aguadita, la cual es recordada como una aguada temporal que proveía agua a los campesinos de los alrededores y que ahora es un parche de pasto cortadera y un pequeño espejo de agua. La restauración de las aguadas permite aumentar su capacidad de almacenamiento y diversificar su uso para el establecimiento de sistemas de producción acuáticos, como los que se mencionan para los jagüeyes.



Figura 5-5 Aguada villa de flores, ejido El Naranjal. Se observa como el volumen de almacenamiento de la aguada se ha reducido por los sedimento y como las gramíneas aprovechan esta condición para crecer y a su vez disminuir más el volumen de la aguada.

Además existen grandes zonas de pérdida de la cobertura vegetal producto de incendios o huracanes que destruyen grandes extensiones de selva. Por otro lado en toda la región y notoriamente en las cercanías a los asentamientos humanos se distinguen las zonas de labranza y barbecho.

c) Escurrimiento superficial

Para determinar el potencial de captación de cada sitio de obra, es necesario saber cuánta agua escurre por el área de captación y llega al punto de almacenamiento.

Por otro lado, el análisis de los funcionamientos de los cuerpos de agua propuestos se basaron en una precipitación promedio utilizando el método de los polígonos de Thiessen y los valores medios mensuales, de tal manera se tienen aportes mensuales al vaso. Las siguientes figuras y tablas muestran los resultados del análisis.

Para el desarrollo del modelo lluvia escurrimiento, se utilizó un método de parámetros concentrados para estimar el volumen de aporte mensual al vaso. A partir de la expresión de la fórmula racional, se expresa en términos de volumen de agua drenada en lugar de intensidades de lluvia y gasto, de tal manera que se calculen los volúmenes de aporte mensual.

$$V^* = C * hp_{\text{mensual}} * A_c$$

donde :

V^* , Volumen mensual de entrada al vaso

C , Coeficiente de escurrimiento

hp_{mensual} , Lámina de lluvia mensual

A_c , Área drenada

... 5.3

El potencial de captación se refiere al volumen de agua que pasa por cada uno de los sitios identificados con oportunidad de construir un bordo o un jagüey. Para esto, es necesario identificar el área de captación de cada uno de los sitios seleccionados, y a su vez el área correspondiente a los diferentes coeficientes de esorrentía, según se explicó anteriormente. Para definir las áreas de captación se usaron los datos de topografía proporcionadas por el INEGI en las cartas de escala de 1:50.000. Es importante anotar que las cotas de estas cartas presentan una diferencia de altitud de 10 m. entre cada cota, y teniendo en cuenta la topografía de la región, característica de sistemas Kársticos, dificulta la delimitación detallada de las microcuencas. Por lo que se deicidio definir las microcuencas uniendo los puntos más altos aguas arriba de los sitios seleccionados y partiendo las zonas altas de recarga por los puntos más cercanos a el sitio de almacenamiento.

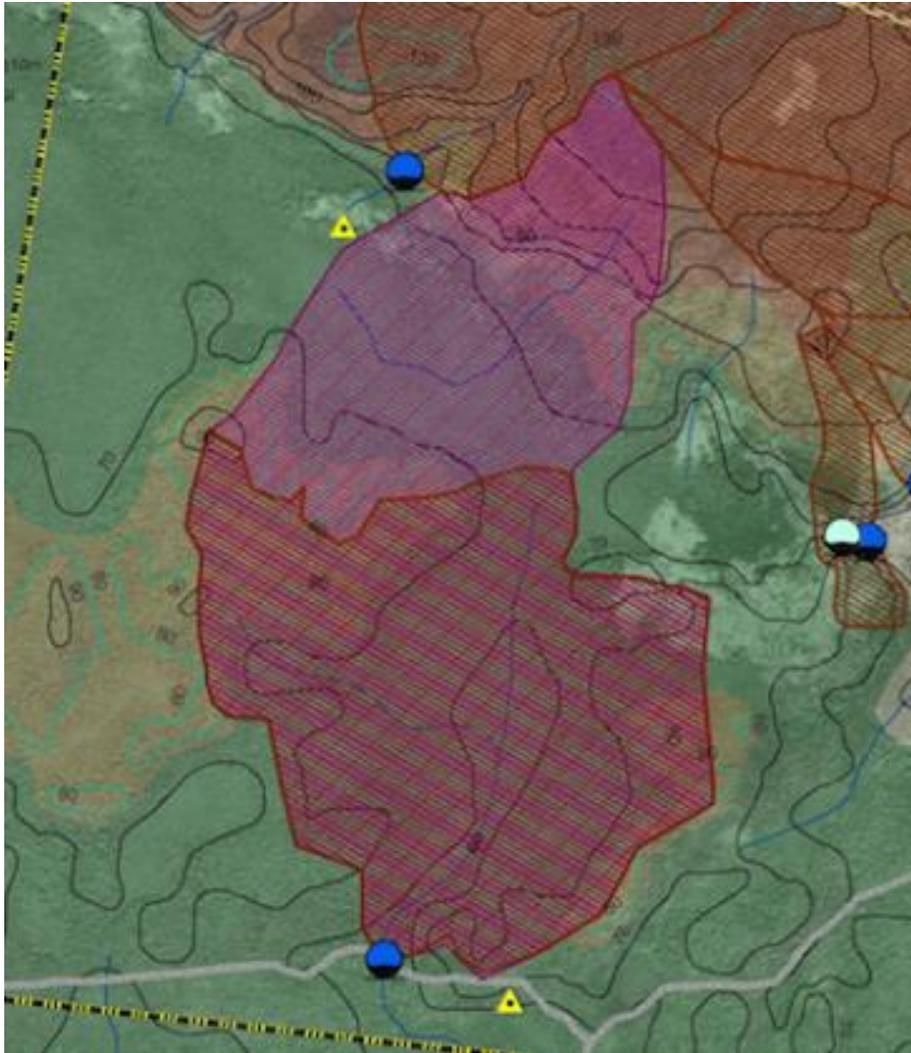


Figura 5-6 Delimitación de microcuencas. El área más grande muestra el trazo de la microcuenca siguiendo la topografía del INEGI, la más pequeña, en color rojo delimita la micro cuenca ajustada según los criterios definidos por los recorridos de campo y el modelo digital de elevación.

Una vez determinada el área de captación y las áreas con diferentes coeficientes de escorrentía, se usan los datos climáticos de precipitación para calcular el potencial de captación de cada sitio. En el ejido El Naranjal fueron identificados seis sitios de almacenamientos con sus respectivas áreas de captación, con un potencial de captación total de 622,125,000 m³.

Tabla 5-7 Aporte mensual de cada una de las áreas de captación en el ejido El Naranjal. Se definió un coeficiente de escorrentía según el uso de suelo de cada paraje y los valores de precipitación de la estación 23044 Adolfo López Mateos.

El Naranjal	Precipitación [mm]	AguadaSoh Ak'al	Aguada Guadalupe	Mecanizado bajo	Mecanizado alto	Entrada Noh Naranjal	Bordo A. Escondida	Aguada Escondida	UAIM	Tierra colorada alto	Tierra colorada bajo	Bordo del mecanizado	Aguada Wüiro	Olla de Guadalupe
Mes	Normal	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
Enero	66.9	16676	5078	18767	5644	3923	2877	1166	13943	7223	6731	2644	4379	857
Febrero	24.8	6182	1883	6957	2092	1454	1067	432	5169	2677	2495	980	1623	318
Marzo	59.3	14782	4501	16635	5003	3478	2550	1034	12359	6402	5967	2344	3882	759
Abril	48.5	12090	3682	13605	4092	2844	2086	845	10108	5236	4880	1917	3175	621
Mayo	112.0	27918	8502	31418	9449	6568	4817	1952	23343	12092	11269	4427	7331	1434
Junio	152.0	37889	11538	42639	12823	8914	6537	2650	31679	16410	15294	6008	9949	1946
Julio	157.1	39160	11925	44070	13254	9213	6757	2739	32742	16961	15807	6210	10283	2012
Agosto	200.4	49954	15212	56217	16907	11752	8619	3493	41767	21635	20163	7922	13117	2566
Septiembre	198.3	49430	15053	55627	16729	11629	8529	3457	41329	21408	19952	7839	12980	2539
Octubre	148.2	36942	11250	41573	12503	8691	6374	2583	30887	16000	14911	5858	9701	1898
Noviembre	104.1	25949	7902	29202	8782	6105	4477	1815	21696	11239	10474	4115	6814	1333
Diciembre	54.5	13585	4137	15288	4598	3196	2344	950	11359	5884	5484	2154	3567	698
	1326.1	280828	85520	316035	95045	66070	48453	19639	234802	121628	113354	44533	73743	14426

Además se realizaron los cálculos de lluvia efectiva a partir del método del número N, de tal manera que se estima la lámina de escurrimiento por cada uno de los tipos de cobertura. Se tomaron en cuenta las zonas de barbecho y de agricultura.

Tabla 5-8 Valores de número N para cada uso de suelo

Uso	Tipos de Suelo		Práctica	condición hidrológica
	Nombre	N		
Bosque	Ak'alché (Bajos)	61	-	Buena
Áreas forestales pastos o huertos, perennes o caducifólicos	Ak'alché (Huamil)	86	-	mala
Áreas forestales pastos o huertos, perennes o caducifólicos	Ak'alché (Huamil)	82	-	regular
Áreas forestales pastos o huertos, perennes o caducifólicos	Ak'alché (Huamil)	79	-	Buena
Bosque	Puslum (monte alto)	15		Buena
Áreas forestales pastos o huertos, perennes o caducifólicos	Puslum (Huamil)	32		Buena
Áreas forestales pastos o huertos, perennes o caducifólicos	Puslum (Huamil)	55		Mala
Barbecho	Puslum (monte alto)/parcela	74	conservación	Buena
Barbecho	Ak'alché (bajos)/parcela	90	conservación	Buena
Siembra densa leguminosas o praderas con rotación	Milpa en Ak'alche o ya'ax 'hom	83	conservación	Buena
Siembra densa leguminosas o praderas con rotación	Milpa en Puslum	55	conservacion	Buena
Siembra densa leguminosas o praderas con rotación	Milpa en Ak'alche o ya'ax 'hom	80	En contorno	Buena
Rancherías, pueblos y zonas urbanas (500 m2 max)	Ak'alché (bajos)	85		
Rancherías, pueblos y zonas urbanas (500 m2 max)	Puslum (monte alto)	77		
Pavimentados con cunetas	arretera (en bajo o monte	98		
terracería de grava	sacbé (caminos)	72		

Utilizando los valores de precipitación diaria y el facto de ajuste al número N por lluvia antecedente se estiman los valores diarios de la lámina de lluvia en exceso. Los valores ponderados de N tomando en cuenta las diferentes coberturas y los diferentes tipos de suelo se calcularon con la expresión siguiente;

$$N = \frac{N_1A_1+N_2A_2+\dots+N_nA_n}{A_c} \quad \dots 5.4$$

Dependiendo si hubo lluvia antecedente los 5 días anteriores se aplica el siguiente factor de corrección al número N.

Tabla 5-9 Corrección por lluvia antecedente

N Escurrimiento	Lluvia antecedente	
	Corrección A Menor 2,5 cm	Corrección B Mayor 2.5 cm
10	0.4	2.22
20	0.45	1.85
30	0.5	1.67
40	0.55	1.5
50	0.62	1.4
60	0.67	1.3
70	0.73	1.21
80	0.79	1.14
90	0.87	1.07
100	1	1

Y por lo tanto, se logra calcular la precipitación efectiva en lámina en cada día con la expresión siguiente:

$$P_e = \frac{\left[P - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \dots 5.5$$

En donde P y Pe están en cm. El rango de aplicación de la ecuación según Chow (1962), es para valores de $P > \frac{508}{N-5.08}$ por lo tanto es necesario lluvias considerables para hacer válido el método, sino no se toman en cuenta en la serie de cálculos. Se selecciona un tipo de suelo y un una hectárea para conocer la precipitación efectiva diaria, considerando la restricción.

Tabla 5-10 . Ejemplo de cálculo de precipitación efectiva.

N cuenca	adm	50
A cuenca	m ²	10,000
Factor de corrección Tipo A		0.620
Factor de corrección Tipo B		1.40

Los resultados se encuentran en el Apéndice 3.

d) Humedad del suelo

Para comprender cómo el suelo retiene el agua y los nutrientes, es indispensable conocer las propiedades de los coloides y su relación con la estructura del suelo. Dentro de la fracción mineral del suelo, las arcillas constituyen la parte más importante desde el punto de vista agronómico. Existen dos grupos principales de minerales de arcilla; las arcillas silicatos, (caolinita y montmorillonita) y las arcillas óxidos, que incluyen los óxidos primarios de hierro y aluminio. La forma más común de la arcillas son de tipo laminar, por lo que tienen gran superficie expuesta por peso unitario. Como unidad básica, están constituidas de dos clases de estructuras fundamentales: Los tetraedros de sílice y octaedros de alúmina. La cantidad de nutrientes y agua que logre almacenar el suelo dependerá de la forma en la que se acomoden los minerales, dicho de otra forma, la capacidad de intercambio catiónico que tenga el suelo dependerá del tipo de acomodo de los minerales.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), está definida como la cantidad de cationes intercambiables por unidad de peso del suelo, se mide en miliequivalentes por cien gramos de suelo (me/100 g) y se refiere a la cantidad de nutrientes que un suelo puede suministrar a las plantas.

Así, si se une un látice de tetraedros de sílice con un retículo de octaedros de alúmina, en una relación 1:1, se obtiene la estructura de la caolinita. La capacidad de intercambio catiónico de este tipo de arcilla es reducida, 10 meq/100g de suelo aproximadamente, sin presentar gran cantidad de almacenamiento de agua y nutrientes. Por otra parte, si a la estructura de caolinita se la agrega otro látice de tetraedros de sílice, ahora una relación 2:1, se obtiene la configuración de la montmorillonita y la capacidad catiónica es mucho más grande, 100 meq/100g de

suelo. Por lo tanto, la montmorillonita se expande y contrae fácilmente a humedecerse y secarse, esto indica que tiene capacidad de almacenar agua y nutrientes, más en relación a la colinita. Sin embargo, suelos con alto contenido de ésta arcilla se fisuran al secarse y tienden a ser impermeables al humedecerse.

Por otro lado, dentro de la porción orgánica del suelo, que se origina a partir de la descomposición de residuos de las plantas y desechos animales, produce partículas muy pequeñas con características coloidales. La textura es una característica importante del suelo ya que determina la capacidad de retención y almacenamiento de agua y nutrientes para las plantas. De acuerdo al porcentaje de arena, limo y arcilla, que conforme un suelo será su capacidad de retención de agua y nutrientes.

De manera general, los suelos granulares (esferoidal) y los de grano simple (sin estructura) tienen una rápida infiltración (mayores a 12 cm/hr), los bloques y los prismáticos tienen velocidades moderadas (de 0.15 a 12.7 cm/hr) y suelos laminares y masivos tienen baja velocidad de infiltración (menores a 0.51 cm/hr).

La porción en la que se encuentra el humus en suelos cultivados varía entre 1 y 5% y aunque es poca con respecto a los coloides minerales, presenta mayor capacidad de intercambio catiónico, entre 100 y 300 meq/100g de suelo.

Una de las funciones de la fracción orgánica en un suelo es protegerlo contra la erosión, suministrando sustancias cementantes para la formación de agregados benéficos en su estructura, propiciando porosidad al suelo e induciendo una mejor aireación, movimiento del agua y desarrollo radicular de las plantas.

El contenido de humedad que posee el suelo define las fronteras entre los estados del suelo. El límite de contracción se presenta para la frontera entre el estado sólido y semisólido; entre los estados semisólido y plástico es el límite plástico, y para la frontera entre el estado plástico y líquido se define el límite líquido. A la diferencia de contenido de humedad entre el límite líquido y el límite de plástico, es decir cuando el suelo se encuentra en estado plástico se le denomina Índice Plástico, dicho de otra manera, es la cantidad de humedad que el suelo retiene para cambiar a estado líquido cuando ha iniciado su estado plástico. La diferencia de contenido de humedad entre el límite plástico y el límite de contracción, o sea cuando el suelo se encuentra en su estado semisólido, se denomina Índice de Contracción.

El límite plástico es la máxima humedad con la cual se puede formar un rollo de aproximadamente 3.2 mm de diámetro, sin que se agriete o desmorone.

El peso específico aparente de un suelo se define como el cociente entre el peso de un volumen dado de un suelo seco, incluido el espacio poroso, y el peso de un volumen igual de agua.

Densidad real de un suelo:

La densidad real de un suelo, es la relación que existe entre el peso del suelo en estado seco y el volumen de sus partículas

$$D_r = \frac{PSS}{V_p}$$

D_r = densidad real

PSS = peso del suelo seco

V_p = volumen de las partículas

... 5.6

Densidad aparente

La relación que existe entre el peso del suelo en estado seco y el volumen total incluyendo poros. A diferencia del peso específico, las dimensiones son de masa por unidad de volumen (ej. gr/cm³).

$$D_a = \frac{PSS}{V_t}$$

D_a = densidad aparente

V_t = volumen total

... 5.7

El procedimiento para determinar la densidad aparente de un suelo se realiza haciendo un hoyo o zanja introduciendo un tubo de bordes cortantes en el terreno, con lo que se obtiene un núcleo o alma, no compacto en el interior del instrumento. La porción de suelo obtenida se seca y el volumen se calcula cubicando el agujero llenándolo de agua (se pueden utilizar plásticos o goma flexible para tener precisión en los cálculos).

Porosidad

Relación entre el volumen de espacio vacío, y el volumen total del suelo, se expresa en porcentaje.

$$P_r = \frac{\text{volumen de vacíos}}{\text{volumen total}} \times 100$$

$$P_r = \frac{D_r - D_a}{D_r} \times 100$$

P_r = Porosidad

... 5.8

El espacio poroso influye sobre la capacidad de retención del agua y sobre el movimiento del aire, del agua y crecimiento de las raíces de las plantas en el terreno. Teniendo repercusiones en el valor productivo del suelo.

El reconocimiento de la importancia del contenido hídrico del suelo en relación con el crecimiento de las plantas ha tenido por resultado la creación de muchos métodos para medir el agua del suelo. No solo hace falta medir a tiempo los cambios en el almacenamiento de agua en el suelo para poder calcular la evapotranspiración, sino que también existen muchas circunstancias en que hacen falta medidas en puntos específicos y en distintas profundidades o situaciones.

También existen muchas situaciones experimentales en que una medida y un control cuidadosos de la humedad del suelo son necesarios para poder interpretar debidamente los resultados.

Algunas prácticas que deben seguirse para mantener y mejorar la estructura de los suelos regados son:

- Arado más profundo que las capas compactas, y a profundidad variable cada año.
- Permitir la aireación del terreno, mientras resulte posible después de arar, antes del riego, previo a la siembra o a la plantación.
- Reincorporar al terreno la mayor cantidad de materia orgánica
- Una buena rotación de leguminosas
- Reducir las operaciones de cultivo y labores al mínimo.

$$\Delta W = P - (O + U + E) \quad \dots 5.9$$

En la cual ΔW es el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo (contenido inicialmente menos contenido final) durante el periodo de la medida, y P, O y U son precipitación, escurrimiento y drenaje profundo, respectivamente. U se define como la cantidad de agua que pasa por debajo de la zona de raíces, o, para fines experimentales, como la cantidad que pasa por debajo de del punto más bajo de la medida. E es la evaporación (incluyendo transpiración) de las superficies de la planta y del suelo. Esta expresión puede emplearse en cualquier escala, pasando desde las masas de tierra continentales y captaciones hidrológicas hasta las plantas individuales. Durante periodos de tiempo seco entro lluvias o riegos, y descuidando (o midiendo de otro modo) U, $E = \Delta W$, y por consiguiente puede medirse determinado cambios en el almacenamiento de agua del suelo bajo la comunidad vegetal que se estudie.

Las medidas de ΔW se efectúan con mayor exactitud usando lisímetros flotantes o de pesas, siempre que estén debidamente diseñados y colocados. Sin embargo, no pueden emplearse cuando la naturaleza compleja de la composición de la especie, la distribución espacial de la vegetación, la profundidad y ramificación del sistema de raíces, las dimensiones de las plantas o demás factores imposibilitan la simulación del ámbito del ámbito natural dentro de propio lisímetro.

En tales casos, la determinación del almacenamiento de agua de suelo en distintos puntos de la comunidad proporciona la única técnica para evaluar ΔW , como es en el caso de estudio.

6. Obras y prácticas de retención para el almacenamiento de agua

a) Obras en la cuenca: Gaviones, cabeceos de cárcava y medidas no estructurales

Las zonas de recarga ofrecen una gran abundancia de madera muerta en forma de ramas y troncos delgados, lo cual ofrece un recurso importante para establecer franjas de necromasa en contra de la pendiente que disminuyan la velocidad de escurrimiento del agua. Estas franjas se deben acomodar siguiendo el contorno de la tierra para evitar la concentración del flujo en lugares aleatorios y promover la formación cárcavas. Estas estructuras de ramas y troncos tienen entre 50 cm y 1 m de altura y entre 60 cm y 1.2 m de grosor en su base.

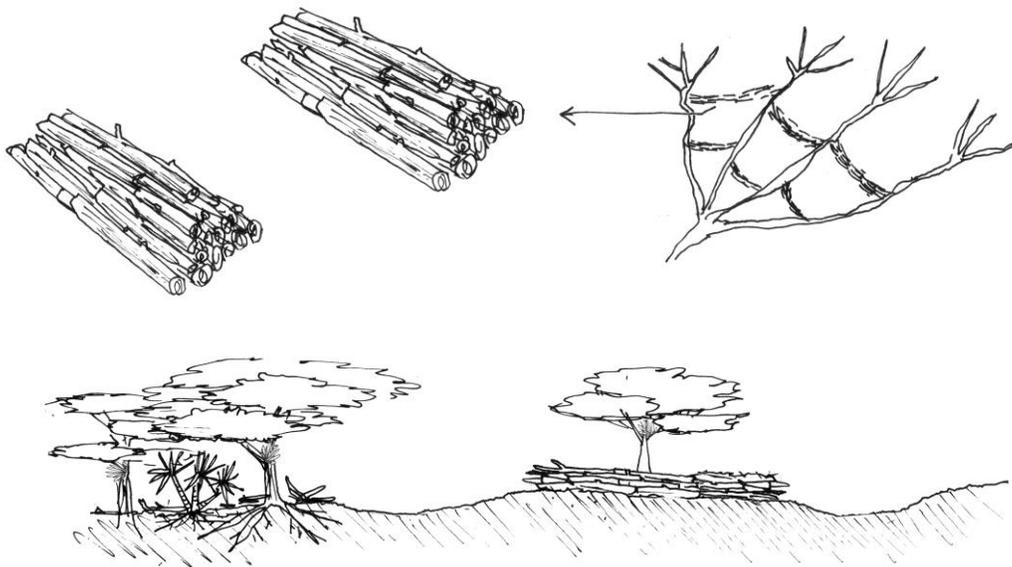


Tabla 6-1 Patrones de escurrimiento en zona de recarga y ubicación de franjas de necromasa.



Figura 6-1 Franjas de necromasa acomodada en zonas de escorrentía en el ejido San Juan, Amanalco de Becerra, estado de México.

Las zonas de escurrimiento presentan una cobertura vegetal más densa y con árboles que a menudo superan los 30 m de altura. La presencia de ramas y troncos es más escasa y abunda la hojarasca que es la principal responsable de proteger el suelo de la acción erosiva de la lluvia. Por el tipo de suelo característico de estas áreas, el recurso primario para la formación de barreras que disminuyan la velocidad de escurrimiento del agua es la piedra. Estas estructuras de piedra acomodadas son conocidas como tecorrales y corresponden a franjas de piedra acomodadas siguiendo el contorno de la tierra. Estas obras deben ser dotadas de una obra de desagüe, pues por las características del paisaje existe la posibilidad que la acumulación de materia orgánica en forma de hojas y pequeñas ramas, y la erosión natural del suelo disminuyan tanto el

escurrimiento del agua que ocurran anegaciones en la parte aguas arriba del tecorral y cuando el volumen de flujo exceda la capacidad de almacenamiento, el agua busque un lugar para evacuarse. En el caso de no existir obras de desagüe puede romper la estructura y dar inicio a la formación de cárcavas. Las obras de desagüe deben ser instaladas en la parte aguas, logrando así hidratar las partes más secas del paisaje y esparciendo el flujo a través del suelo. Los tecorrales deben tener una altura constante, seguir el contorno de la pendiente y su desagüe debe ser 20 cm más bajo que el punto la altura promedio del tecorral y tener una longitud de 5 m.

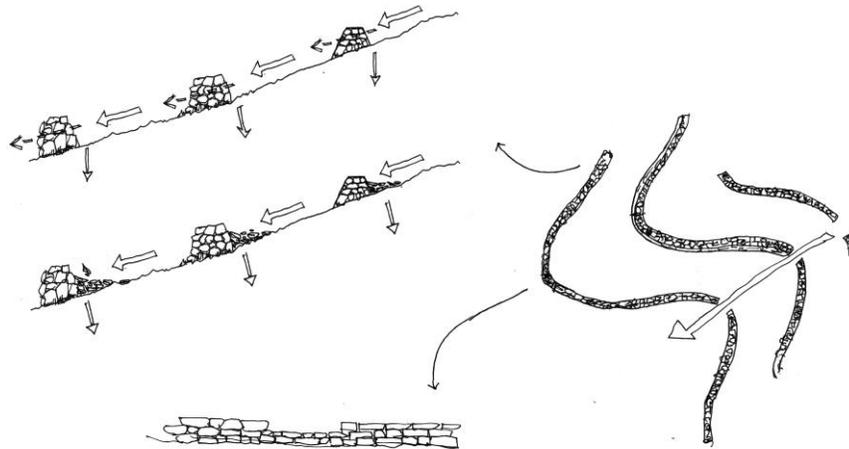


Figura 6-2 Tecorrales de piedra acomodada, ubicación y corte de obra de desagüe.

Las obras en los corrientales están enfocada en disminuir la velocidad del agua que escurre por ellos para promover la infiltración y capturar sedimentos orgánicos y minerales. De esta manera la formación sucesiva de la cárcava se detiene, se rehidratan los valles aguas arriba y se retienen elementos formadores de suelo en zonas donde pueden ser utilizados para los sistemas de producción y/o de regeneración de la funcionalidad del ecosistema.

Las obras propuestas para el manejo de los corrientales son: los retranques para la disminución de la velocidad de escurrimiento, la estabilización de taludes y los cabeceos de cárcava. Los retranques son barreras de piedra que se ubican perpendiculares al flujo del agua por el corrial, la estabilización de taludes interviene los bordes del corrial para que puedan ser revegetados y su suelo sujeto a un agarre mecánico por las raíces de plantas, y los cabeceos de cárcava estabilizan la formación del corrial para que no se siga erosionando su punto de nacimiento.

El retranque de piedra acomodada, es un muro de piedras sobrepuestas, unas sobre otras, que se van traslapando para lograr una mayor estabilidad y resistencia. Al centro de la longitud del retranque se deja una vertedor o desagüe para permitir la salida del agua al centro de la barranca y así evitar que se sigan

erosionando los taludes. Al frente del muro de piedra se construye un delantal de piedras acomodadas que soportaran el impacto de la caída del agua, evitando que esta erosione el fondo del corriental, debilite la estructura del retranque y siga erosionando la cárcava, imagen. Estas estructuras cumplen la función de detener sedimentos, que luego pueden ser aprovechados en las actividades agrícolas, ya sea como tierra para semilleros o para las compostas, y a su vez, asisten en la infiltración del agua, pues disminuyen la velocidad del escurrimiento y promueven la infiltración recargando así los acuíferos, regenerando los manantiales y rehidratando el paisaje.

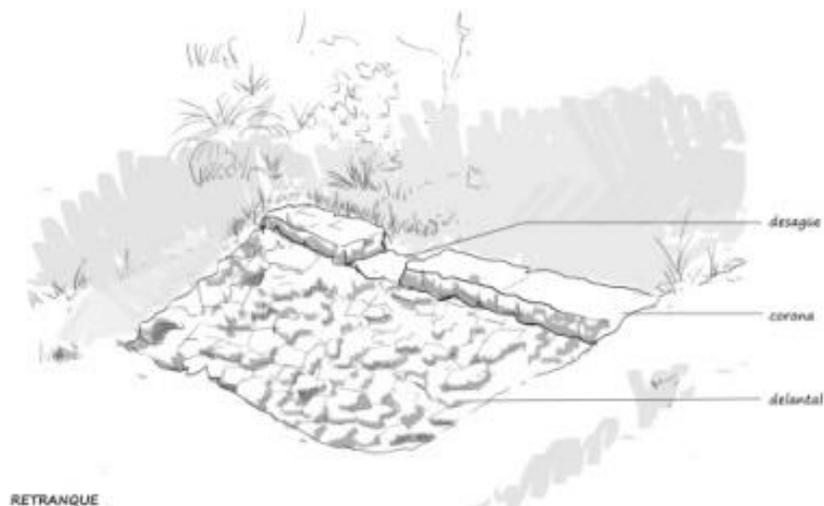


Figura 6-3 Retranques de piedra acomodada, ejido San Juan, Amanalco de Becerra, Estado de México. Esquema del retranque y sus componentes.

En dos de los corrientales recorridos, se marcaron 18 sitios para construcción retranques para un volumen total de piedra acomodada de 49.12 m³.

La estabilización de taludes regenera la pendiente necesaria para el establecimiento de vegetación en los bordes del corriental, y que con su estructura radicular genere una resistencia mecánica al arrastre del suelo. Esta práctica se implementa en zonas donde los taludes aún no han expuesto la roca madre, o en los bordes del talud que exponen el perfil del suelo.

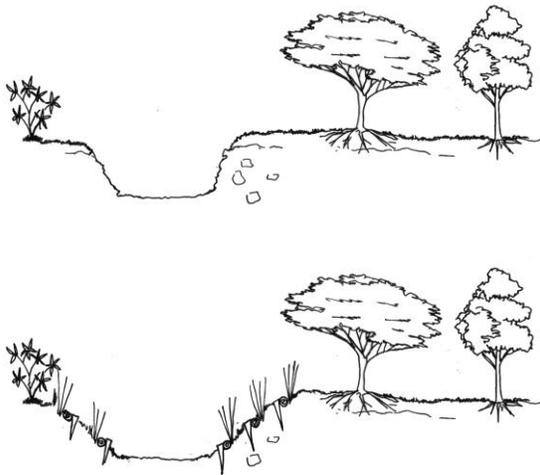


Figura 6-4 Talud de corriental inestable y talud estabilizado.

Todos los corrientales recorridos en el ejido requieren de obras de estabilización de taludes.

Los cabeceos de cárcava son muros de mampostería contruidos contra el talud formado por el escurrimiento del agua. En la parte superior central del muro se construye el vertedor o desagüe haciéndolo coincidir con el cauce del escurrimiento para encausar el agua al centro de la barranca. Al frente del muro de piedra se construye el delantal de piedras acomodadas que recibe el impacto de la caída del agua, evitando así que se erosione el fondo de la barranca y debilite la estructura de la obra. A diferencia de los retranques, la función de estas estructuras es detener el proceso de crecimiento de la barranca y proteger el talud del nacimiento de la barranca del efecto erosivo del agua.

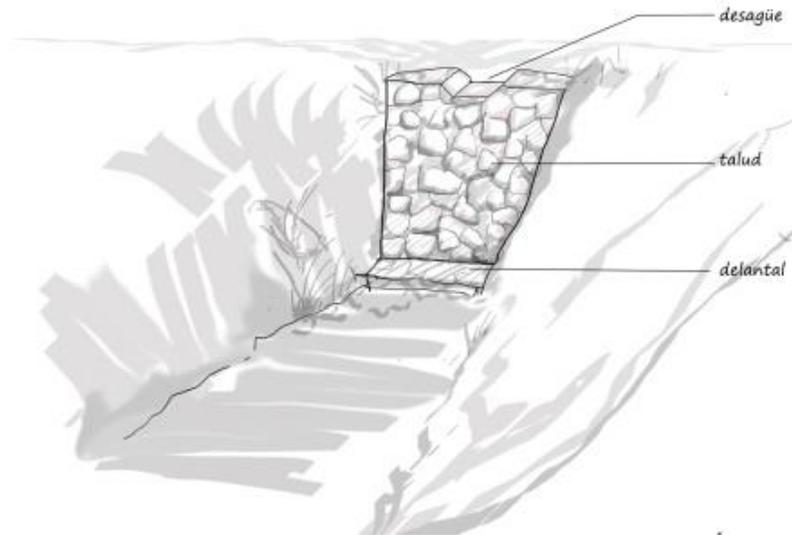


Figura 6-5 Esquema de cabeceo de cárcava y sus componentes.

En el corriental de Tierra Colorada fue ubicado un sitio para la construcción de un cárcava, pero lo más probable es que a medida que se avance en el manejo y restauración de estos elementos del paisaje, se ubiquen más sitios para este tipo de obras.



Figura 6-6 Cabeceo cárcava en proceso de construcción, microcuenca de San Juanito, ejido San Juan, Edo. México.

Los cercos vivos actúan como elementos de conexión entre parches de bosques y los sistemas de producción campesina, permitiendo un flujo genético entre fragmentos de vegetación nativa, y a su vez sirviendo como fuentes de hábitat para organismos benéficos dentro de los agroecosistemas.



Figura 6-7 Cercos vivo productivo.

Las zanjas de infiltración son estructuras de tierra construidas para capturar el agua de escorrentía e infiltrarla en el suelo. Además atrapan sedimentos resultados de la erosión y generan una oportunidad para el establecimiento de sistemas agroforestales. Estas se trazan siguiendo el contorno de la tierra y son generalmente afianzadas con la siembra de árboles y diferentes plantas perennes que aseguren su estabilidad. Tienen pendientes controladas de entre 1:400 a 1:1000 dependiendo de lo accidentado de la topografía-



Figura 6-8 Mapa general del Ejido con la ubicación de obras y microcuencas

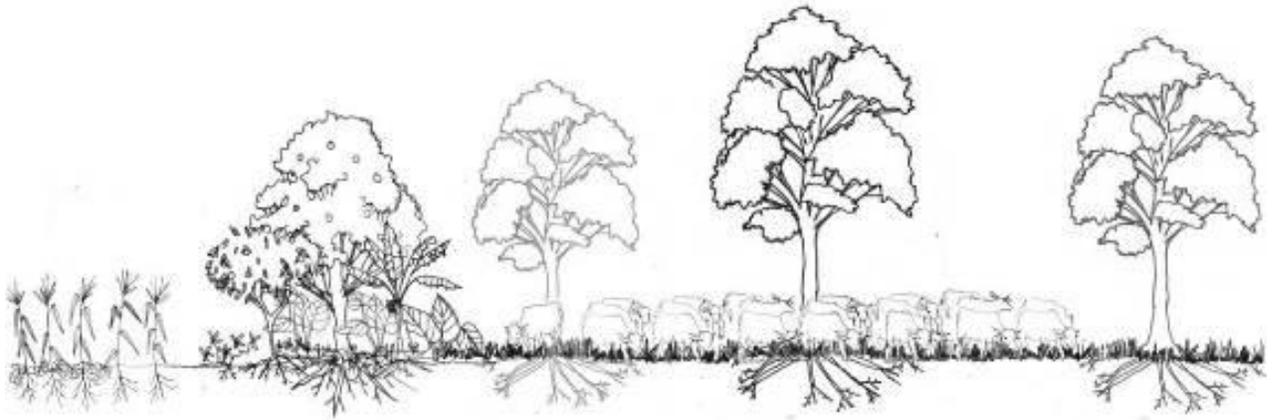


Figura 6-9 Esquema general de un sistema silvopastoril

b) Bordos o presas, jagüeyes y cisternas

Los almacenamientos superficiales son estructuras construidas o almacenamientos naturales restaurados que permiten almacenar agua para consumo humano, animal o de riego. Preferentemente son estructuras de tierra y responden a la topografía para su ubicación, tipo y forma de construcción. De acuerdo a las necesidades y potencialidades del territorio ejidal, se identificaron posibilidades de almacenar agua en presas, jagüeyes y aguadas naturales que requieren mantenimiento y restauración y que fueron parte de la estrategia de desarrollo cultural y manejo e integración con el paisaje de los pueblos Mayas.

Jagüeyes

Son excavaciones en las zonas bajas con suelos arcillosos que permiten el almacenamiento de agua a gran escala y el establecimiento de sistemas de producción acuícola. Los jagüeyes se ubican en las partes más bajas del paisaje, por lo general en los bajos y sabanas inundables donde a través de los años se han formado suelos con alto contenido de arcilla que permiten la compactación e impermeabilización de los vasos de almacenamiento. A través del diseño, estas obras pueden estar asociadas a sistemas de producción acuícolas que aprovechan diferentes profundidades de almacenamiento, por lo que se puede pensar en zonas de producción de cultivos inundados como el arroz (*Oryza sativa*) y el makal (*Colocasia esculenta*); producción de forrajes acuáticos como la lenteja de agua (*Lemna spp.*), el jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) de agua o la espinaca de agua (*Ipomoea acuática*); y la piscicultura.



Figura 6-10 Detalle de las posibilidades productivas del jagüey. Es fundamental que se tenga una profundidad mayor a 1.2 m para la recirculación del agua por cambios de temperatura y diferentes niveles para dar oportunidad de crecimiento a diferentes plantas.

Al igual que las aguadas, el potencial de captación y de almacenamiento de estas obras es el de mayor volumen, ya que están proyectados en las partes más bajas del paisaje donde son comunes las inundaciones temporales, lo cual indica la magnitud de los volúmenes de agua que fluyen por ahí, y al estar en los bajos o sabanas se escavan y no están limitados a la geomorfología específica del sitio, como si lo están las presas. Sin embargo para el aprovechamiento del agua almacenada en los jagüeyes en los sistemas de producción y sustento, a parte de los sistemas de producción acuícolas, es necesario el bombeo, ya que no tienen potencial de uso por gravedad por las razones descritas anteriormente. En el ejido El Naranjal, fueron identificados cinco sitios potenciales para la construcción jagüeyes.

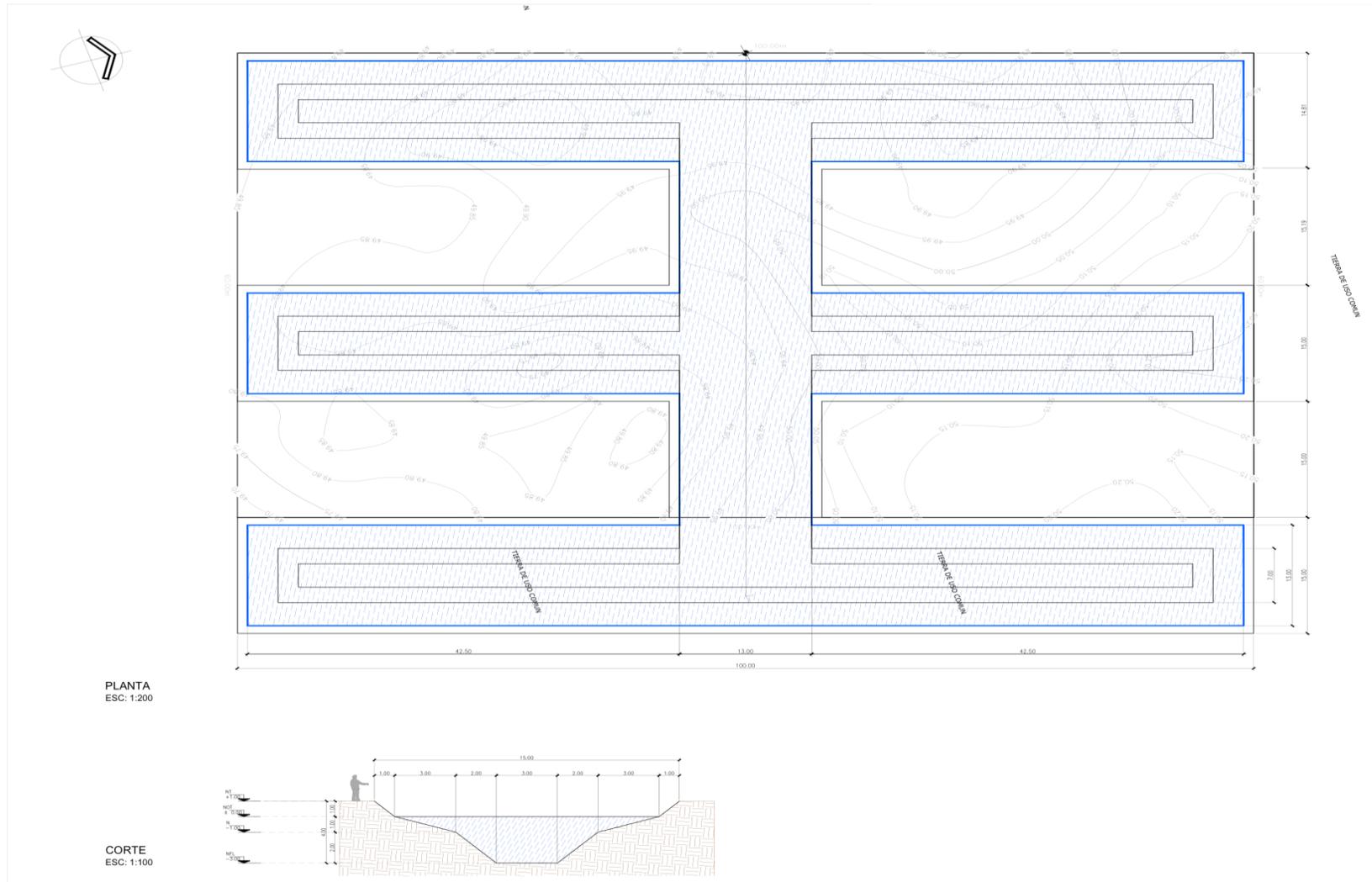


Figura 6-11 Diseño de un Jagüey excavado con oportunidad de producción agrícola en las terrazas intermedias

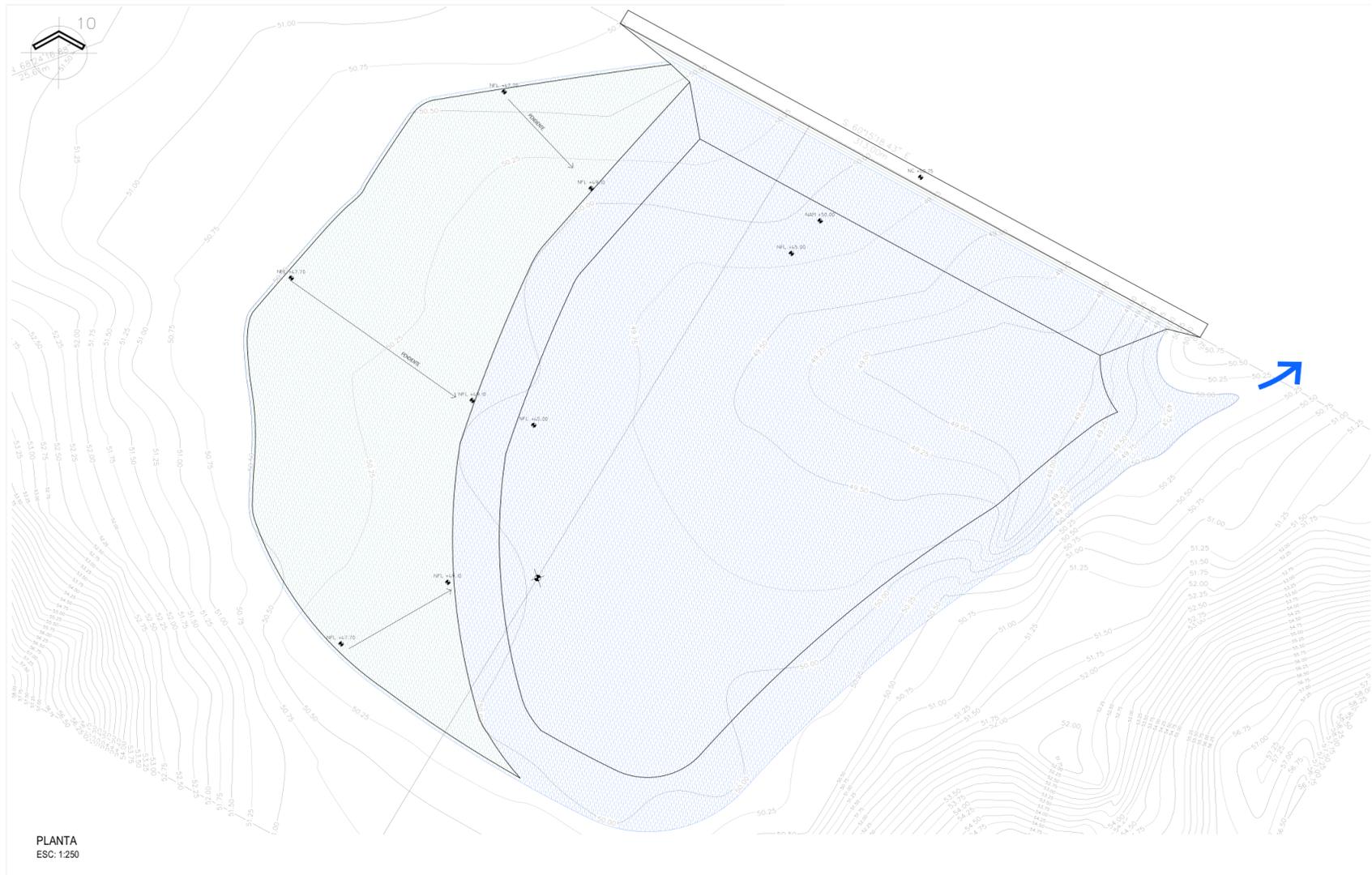


Figura 6-12 Diseño de Jagüey con parte excavada y un bordo para aumentar el almacenamiento y aprovechar el terreno natura

Presas de valle

Las presas se refieren a bordos de tierra contruidos en contra del escurrimiento del agua. Su ubicación ideal responde al punto clave, que es el punto donde el perfil cambia de convexo a cóncavo, este permite un mayor volumen de almacenamiento de agua por volumen de muro construido y es el punto más alto donde económicamente se puede construir una presa para aprovechar el potencial de la gravedad para la distribución de agua. Existen varios tipos de presas pero las más comunes son las presas de silla, las presas de contorno y las presas de Valle. Sus nombres corresponden a la ubicación que tienen en el perfil del paisaje.

Las presas de valle o barrera responden a una geometría sencilla y son las más comunes. Para su construcción se levanta un muro de tierra o de mampostería perpendicular al flujo del agua en un valle o escurrimiento superficial. Estas presas son muy eficientes en la inversión en relación con el volumen almacenado, pues cuando son bien ubicadas inundan los valles aguas arriba mucha más distancia que la longitud del muro construido perpendicular al flujo del agua. Por su ubicación deben ser muy bien calculadas y equipadas, pues deben estar preparadas para eventos de precipitación atípicos y de importante magnitud con robustas obras de desagüe, además, si están ubicadas en cauces donde se conoce la presencia de peces migrantes, deben estar equipadas con una “escalera para peces” para que estos puedan cumplir su meta migratoria y llevar a cabo su proceso reproductivo. En el ejido El Naranjal, fueron ubicadas cinco presas de valle.



Figura 6-13 Presa de valle.

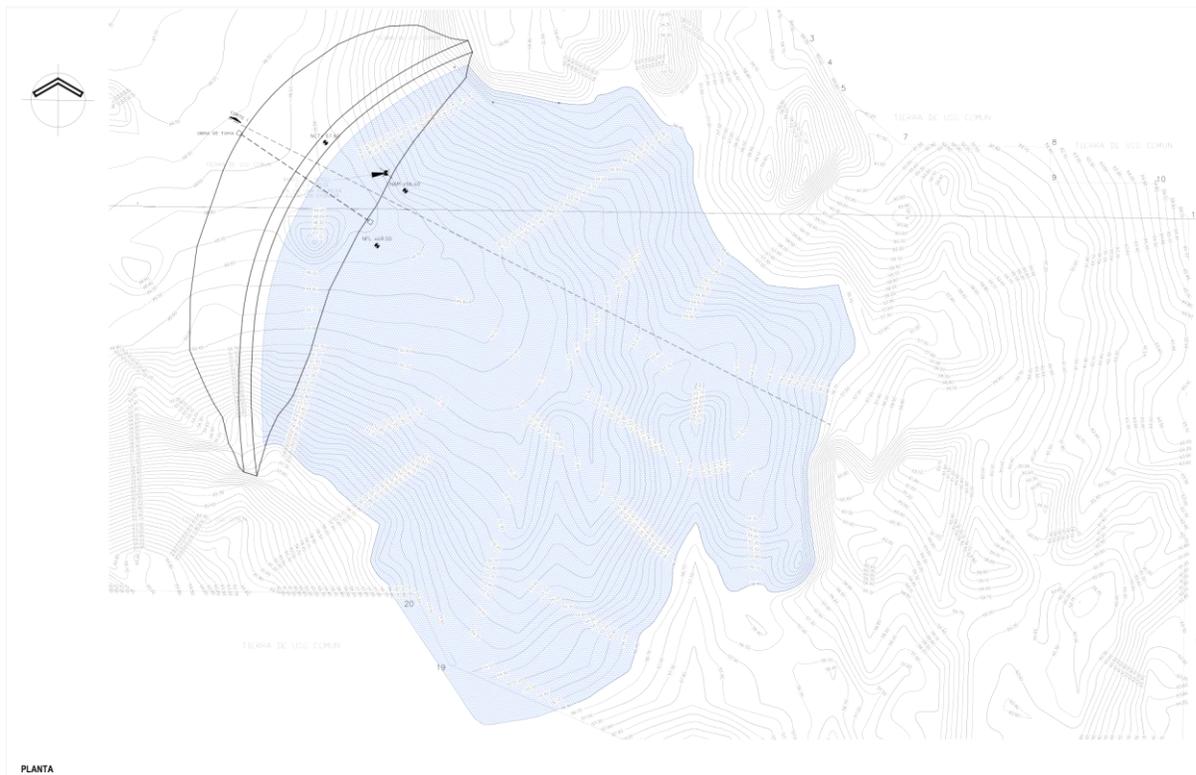


Figura 6-14 Presa de Valle en una cuenca del Naranjal

Presas de contorno

Las presas de contorno pueden ser construidas siguiendo el contorno del territorio, siempre y cuando estén ubicadas en un área lo suficientemente plana para que el volumen de la cortina deje espacio para el almacenamiento de agua en la parte alta de la pendiente. Estas presas son construidas de tierra y necesitan tener canales de captación de agua para su llenado, pues por su ubicación tienen áreas de captación muy reducidas. Después de las presas de silla, son las que mas alto pueden estar en el paisaje y tener un buen potencial de gravedad, su volumen de almacenamiento y la eficiencia de la longitud de su bordo en relación con el volumen almacenado depende de la topografía que aguas arriba del muro, pero por lo general son menos eficientes que las presas de valle. Esta ineficiencia se ve compensada por el potencial de la gravedad para la distribución del agua. En el ejido El Naranjal, no fue ubicada ninguna presa de contorno.

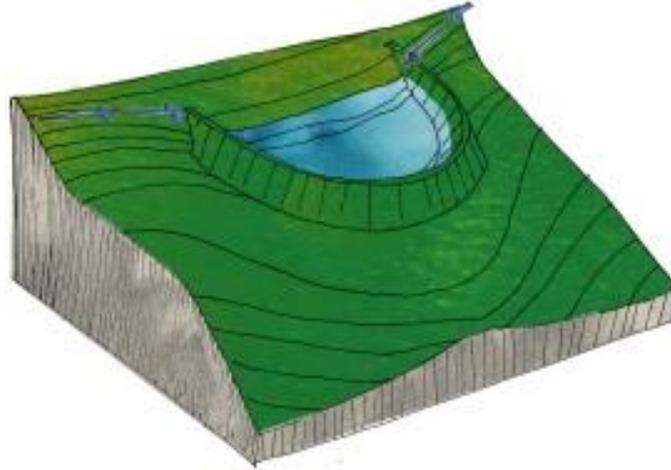


Figura 6-15 Presa de contorno

Presas de silla

Las presas de silla son las que se puede ubicar en las partes más altas del perfil del paisaje y requieren de dos bordos construidos entre dos puntos altos. Se escava el sedimento acumulado entre los dos cerros y se usa para conformar cada uno de los muros que comienzan en un cerro y terminan en el otro. Estas estructuras de tierra deben ser muy bien calculadas, ya que no tienen área de captación salvo por el área de su propio espejo de agua, por lo que deben ser acondicionadas con zanjas de desviación que se extienden a los lados de los cerros dándoles lo vuelta o extendiéndose lo necesario para que el agua de escorrentía captada por la zanja sea la necesaria para llenar el volumen del vas de almacenamiento. En los recorridos en el ejido El Naranjal fue ubicada una presa de silla.

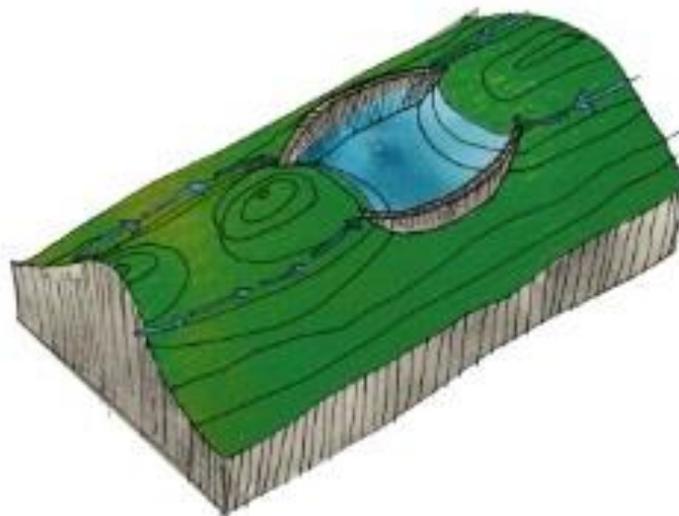


Figura 6-16 Presa de silla

Cisternas

El almacenamiento en cisternas es parte fundamental de una estrategia de aprovechamiento y manejo apropiado del agua en los paisajes campesinos. Estas permiten almacenar el agua de lluvia precipitada en los techos de las casas, corrales y bodegas y a su vez ofrecen agua de excelente calidad para el consumo humano y animal. Teniendo en cuenta los regímenes de precipitación local y por su costo no son factibles para el almacenamiento de agua para riego. Esta práctica sirve como complemento del agua que se provee por el acueducto comunitario e incluso ofrece un líquido de mejor calidad, ya que está libre de carbonatos muy presentes en el agua bombeada de los pozos de la región.

Hay diversos tipos de cisternas y sus costos varían dependiendo del material y métodos constructivos, pero lo más importante en el diseño y construcción de estas es su dimensionamiento. Las dimensiones deben corresponder al potencial de captación de las superficies y a las necesidades de consumo de la familia campesina.



Figura 6-17 Cisterna de 6,000 lts. Construida con botellas de PET, ejido Las Margaritas, estado de San Luis Potosí.

Según estándares de diseño de redes de agua potable y fundamentada en el número de familias que habitan el ejido, el consumo de una persona en la El Naranjal es de 100 lts/día. Basados en este número, se realizaron cálculos que determinan que el área de captación que necesita un habitante del ejido para suplir el total de su demanda de agua durante el periodo de sequía es de 40 m² y una cisterna de 14 m³ de volumen.

Teniendo en cuenta que los problemas de salud relacionados con cálculos renales son comunes en todos los ejidos miembros de la REPSERAM, debido al consumo de agua de pozos profundos con alto contenido de carbonatos, la captación de

agua de lluvia para el consumo humano se convierte en una opción viable y económica contrarrestando la creciente demanda de agua embotellada que genera fugas en la economía ejidal y nunca alcanza la calidad del agua de lluvia.

A partir de la problemática del desabasto de agua potable en las comunidades, se plantea proponer una solución económica y viable para contar con alternativas de respaldo y cumplir con la dotación necesaria. En la mayoría de los Ejidos hay dificultades en la operación y funcionamiento de los sistemas de bombeo de los pozos y tanques, además la calidad del agua de subsuelo resulta de muy mala calidad, causando perjuicios en la salud pública y en los sistemas de riego. Estos problemas se evidencian en los altos índices de problemas renales y el taponamiento de los sistemas de riego por la acumulación de carbonatos y sales. Este análisis pretende estimar los volúmenes de cisternas y áreas de captación necesaria para cumplir con la dotación para una persona durante todo el año. Observando la información que el INEGI y la CONAPO registra sobre las condiciones socioeconómicas de las localidades, se concluye que son poblaciones que se encuentra en la categoría de pobreza. Basándose en las tablas que propone la CONAGUA sobre dotación de agua por habitante por día, además de los coeficientes de variación diaria y horaria, para calcular los gastos de diseño en sistemas de abastecimiento de agua potable, se define el consume por persona por día.

Se considerará también los datos estadísticos que posee la Dirección General de Construcción y operación Hidráulica, que se proponen para la dotación de agua por número de habitantes por localidad.

Por lo tanto la dotación por habitante por día es de 100 litros y 3000 litros mensuales. Se realizan los cálculos de captación de lluvia, funcionamiento de vaso de las cisternas y el volumen de diseño.

Para el cálculo del volumen de cisternas para dotar de agua todo el año, se tomó en cuenta los valores de dotación de agua para una persona por mes de 3 000 litros y considerando 4 meses en los que no se capta lluvia debido a la poca precipitación (menos de 70mm) se propone una cisterna de 14 m³ como mínimo por persona, por lo que para una familia de 5 personas se necesitará una cisterna de 70 m³ para dotar de agua todo el año para todas las necesidades. La cisterna se considera vacía al iniciar las lluvias.

A partir del funcionamiento de vaso y tomando como base una cisterna de 14 m³ de capacidad se deduce el área mínima de captación necesaria para un consumo de 3 m³ de agua mensual. Se prevé un volumen mínimo en la cisterna de 900 litros por higiene y contingencias.

c) Funcionamientos de vaso

Debido a que no se tiene ningún registro de datos de escurrimiento en los cauces, y las evidencias son muy difíciles de obtener, se realiza un modelo de parámetros concentrados. El método más aceptado en hidrología es la fórmula racional, a partir de ella se genera un hidrograma unitario sintético.

Un hidrograma, como su etimología lo dice, es el registro del paso del agua. Está asociado a un volumen en un determinado tiempo (m³/s). En éste caso, nos

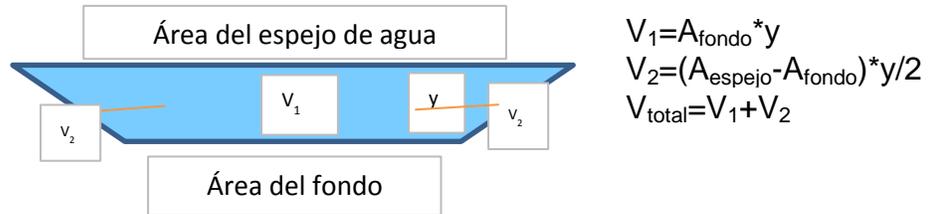
interesa el volumen de agua que entra a los embalses estudiados, provenientes de los atillos y los corrientales.

La mayor importancia de los hidrogramas es conocer el funcionamiento de un río a través del tiempo. En una escala larga (un año o un estación) se puede conseguir información suficiente para el funcionamiento de un vaso y así los niveles de máximos y mínimos en un aprovechamiento (abastecimiento de agua, riego, generación eléctrica, etc); y en una escala de tiempo pequeña (una semana o un par de horas) se logra conocer la evolución de una tormenta o una serie de lluvias. El objetivo de Plan de hidratación de agua, proyecta un ordenamiento del ciclo del agua y propone obras y prácticas que mejoren el funcionamiento del ciclo hidrológico y se logre aprovechar el agua en exceso. Esto se hace aprovechando las oportunidades hídricas que tiene la región y minimizando los efectos negativos del agua en exceso y demás problemática. Por lo tanto, se propone la construcción de bordos de tierra en sitios naturales que, por su geometría y posición, den la oportunidad de tener funcionamientos adecuados en los volúmenes de agua y logren satisfacer las demandas en época de sequía. Sin embargo, es posible que ocurran lluvias tales que, los niveles de los embalses superen a los máximos ordinarios. Es por eso que es necesario el diseño e implementación de obras de excedencias.

El diseño de obras se hizo tratando de formar sistemas entre las presas y aguadas de tal manera que, el almacenamiento de agua fuera el mayor y el tiempo con el que escurre fuese el menor. Es por esto que las presas se modelan interconectadas de aguas arriba a aguas abajo. Para mostrar los cálculos se presenta el funcionamiento de dos vasos interconectados; tierra colorada alto (bordo) y tierra colorada bajo (jagüey). Se muestran en el Apéndice 3.

Para realizar el funcionamiento de cada uno de los vasos de almacenamiento proyectados en el ejido se realizaron los análisis a tres años, de tal modo que se revisara el tiempo en el que llegan a su máxima capacidad y los momentos en los que vierte el vaso. Se consideró un volumen de entrada mensual descrito en el capítulo 5 como potencial de captación, las salidas de los embalses son la evaporación y los derrames. Por lo pronto el análisis no incluye las demandas por riego, únicamente se busca conocer los volúmenes excedentes para generar un aprovechamiento sostenible.

El volumen de cada embalse se calcula suponiendo lo siguiente:



Ecuación 5.10

Como parte del Plan, se diseña un conjunto de represas; con el objetivo de disponer agua de riego sin necesidad de bombeo, disminuyendo costos y aumentando los rendimientos de cultivo. Además sirve como protección de incendios forestales.

Siendo una gran limitante el suelo tan poroso y permeable para la construcción de vasos de almacenamiento, se busca la manera de construir una membrana impermeable al fondo del vaso a partir de arcilla compactada. Normalmente las zonas donde hay arcilla (o ak'alche), no se utilizan para ser laborables para agricultura y en muchos casos son zonas bajas y propensas a inundación, de tal manera que el sitio donde se puede excavar y extraer arcilla se diseña otro vaso de almacenamiento (jagüey), normalmente son las zonas bajas y el suelo excavado se utiliza para crear una membrana para el vaso en la zona alta (bordo). Los bordos de almacenamiento se construyen en la zona de cambio de pendiente o punto clave de la topografía para aprovechar al máximo las diferencias de nivel. Es un hecho que los bordos y jagüeyes excavados son un impacto importante en el paisaje y en el desarrollo del movimiento del agua por el suelo. Por la escala y las condiciones del terreno los espejos de agua varían desde 1,000 m² hasta 20,000 m². En los lugares más amplios. Es un equilibrio entre las necesidades y presión agrícola contra el aprovechamiento hídrico; una mitigación ante los cambios de patrones de clima, y finalmente una salvaguarda contra los estragos que ha sufrido la zona por los cambios de uso de suelo.

Tabla 6-2 Resumen de almacenamiento superficial diseñadas y seleccionadas por el ejido

Nombre	Tipo	Área de captación	Potencial de captación anual	Volumen de almacenamiento máximo
		m ²	m ³	m ³
Aguada Escondida	Bordo de valle	187,936	19,639	18,807
Tierra colorada alto	Bordo de valle	1,084,752	113,354	20,876
Tierra colorada bajo	Bordo de valle	1,163,930	121,628	75,127
UAIM	Bordo Excavado	2,246,968	234,802	9,370
Bordo del Mecanizado	Jagüey	426,168	44,533	65,307
Olla de Guadalupe	Bordo de valle	138,047	14,426	48,678
A. Wüiro	Cisterna de tierra	705,692	73,743	13,391
	TOTAL	5,953,493	622,125	251,556

El ejido cuenta en una primera fase de diseño de obras para el almacenamiento superficial con y vasos de almacenamiento y volumen total de almacenamiento proyectado de 251,556,000 litros.

a) Diseño y dimensionamiento de vertedores

Para el diseño de vertedores de bordos y jagüeyes, es necesario conocer la evolución de los volúmenes de entrada cualquier almacenamiento y así determinar las dimensiones (anchos, pendientes, carga de diseño, bordos libres, etc.) de los vertedores, de tal manera que al ocurrir una tormenta no se rebasen ciertos niveles del agua y se garantice la integridad y seguridad de las estructuras. El escenario contemplado es el más desfavorable, por seguridad se piensa en las peores condiciones.; los niveles en los bordos se consideran al máximo de su capacidad. La duración de la tormenta de diseño es igual o superior al tiempo de concentración de las presas, es decir se presentará el gasto máximo cuando la cuenca se encuentre saturada, escurriendo en su máxima capacidad y ocurriendo una lluvia con una lámina de agua estimada como h_p [mm] máxima. Además no se toma en cuenta la posibilidad de tener obras de toma, que pueden trabajar al mismo tiempo que los vertedores y desaguar los volúmenes de una tormenta. Debido a que los cauces en las subcuencas no son muy definidos y en algunos casos variables año con año, se determinó una longitud de cauce principal al camino hidráulicamente más alejado en la cuenca. Es decir al camino que sigue la parte más baja de la cuenca, desde el parteaguas hasta la salida de la cuenca en el vertedor (por lo tanto, se toma en cuenta la superficie del embalse como cauce).

Utilizando el valor de la precipitación máxima probable para un periodo de retorno dado y las características fisiográficas de cada una de las subcuencas (área de captación, longitud del cauce principal, pendiente de los cauces, tipos y usos del suelo, ordenamiento territorial, etc.), se realiza un modelo de lluvia escurrimiento. En el caso general de los coeficientes de escurrimiento, se determinó el mismo valor que en los cálculos de funcionamiento de vasos. Suelo puzlum en toda la cuenca excepto en el embalse, en donde el coeficiente de escurrimiento es igual a uno. Es necesario el ajuste de los coeficientes de tipo y uso de suelo mediante una caracterización de los suelos y un análisis de los diferentes tipos de coberturas en las áreas de captación (en éste caso no se está considerando el escenario más desfavorable). Para las obras seleccionadas como prioritarias, se realizó el ajuste de las áreas de captación mencionado.

En un volumen de almacenamiento de grandes tamaños, al momento de dimensionar los vertedores, se realiza un tránsito de avenidas, en donde se analizan las entradas y salidas al vaso, observando los niveles del agua en diferencias de tiempo pequeñas (10% de una hora aproximadamente) de tal manera que se observe el comportamiento del embalse en el tiempo que dura la tormenta. Uno pensaría que el nivel del agua aumenta linealmente a comparación de los volúmenes de entrada, sin embargo la forma del almacenamiento no es igual a un vaso recto (con paredes verticales), así que, mientras aumenta el nivel del embalse (aunque rebase el nivel del vertedor), el área de espejo de agua crece y el volumen de entrada tiene oportunidad tener un almacenarse temporalmente en el tiempo que la obra de excedencias descarga dichos volúmenes. En el estudio que se realizó, por falta de detalle en las topografías, alcances del trabajo y por estar del lado de la seguridad, no se toma en cuenta dicho *súper almacenamiento*, de ésta manera se considera que todo el volumen que entra a los bordos es evacuado del mismo conservando el nivel máximo del vertedor (name, nivel de agua máximo extraordinario).

Nuevamente, con el fin de estar del lado de la seguridad, y preveer escenarios desfavorables en el futuro, el modelo de lluvia escurrimiento generado, no considera el trabajo de prácticas y obras que se plantean en las subcuencas, y en todo el territorio Ejidal. Indiscutiblemente generaran un proceso de amortiguamiento de los volúmenes de agua provocados por tormentas y eventos ciclónicos. De tal manera que se podría decir que las dimensiones de los vertedores en un principio serán los límite, sin embargo mediante se trabaje con el proceso de ordenamiento hidrológico y territorial se podrá observar que los niveles de los embales son más estables.

En un principio se calcularon los valores de lluvias máximas diarias a partir de una función de probabilidad Gumbel para un periodo de retorno de 100 años. Se identificaron las características fisiográficas de la cuenca y a partir de ellas se calculó el tiempo de concentración de dicha cuenca. Finalmente tomando como base los hidrogramas unitarios de la armada de los Estados Unidos se determinó un hidrograma particular para dicha tormenta. A continuación los resultados.

Tr Periodo de retorno
hp precipitación
tc tiempo de concentración
Ce coeficiente de escurrimiento

Sc pendiente del cauce
 tp tiempo al pico
 de duración efectiva de la tormenta
 qp gasto de pico
 Ac área de la cuenca
 hpe precipitación efectiva

Lluvias máximas

A partir de la información de CONAGUA y la base de datos CLICOM, se obtienen los valores históricos de precipitación.

Tabla 6-3 Serie de lluvias máximas diarias de cada año de registro, ordenadas de mayor a menor y con las referencias históricas. Estación climatológica número 23044, en el Ejido López Mateos, Municipio de José María Morelos. Quintana Roo.

Año	hp máxima anual	hp máxima anual, ordenados	
1979	30.5	230	No hay certeza
1980	91.5	119	
1981		111	Huracan San Isidro (22/09/2002)
1982		104	
1983	71	100	Se verificó con estacion 23165 (127 mm)
1984	104	95	
1985	45	95	
1986	76	91.5	Huracán Allen (08/07/1980)
1987	70.4	90	
1988	73	84	
1989	95	82	
1990	77	77	
1991	95	76	
1992	69	74	
1993	82	74	
1994	119	73	Huracán Gilberto (14/09/1988)
1995	230	71	
1996	65	70.4	
1997	90	70	
1998	74	70	
1999	65	70	
2000	70	69	
2001	60	65	
2002	111	65	
2003	74	62	
2004	62	60	
2005	60	60	Huracan Wilma (21/10/2005)
2006	70	57.8	
2007	84	45	
2008	57.8	42.8	
2009	32.5	32.5	
2010	42.8	30.5	
2011	100		
2012	70		

Utilizando la distribución de Weibull se determina la probabilidad de ocurrencia de cada lluvia.

$$T = \frac{n + 1}{m} \dots 5.11$$

Tabla 6-4 Ley empírica de Weibull, periodo de retorno. Datos máximos ordenados y cálculo de la probabilidad de ocurrencia

m	Año	hp máxima anual, ordenados	Periodo de retorno de la muestra	Probabilidad de ocurrencia
1	1995	230	33.00	3.03%
2	1994	119	16.50	6.06%
3	2002	111	11.00	9.09%
4	1984	104	8.25	12.12%
5	2011	100	6.60	15.15%
6	1989	95	5.50	18.18%
7	1991	95	4.71	21.21%
8	1980	91.5	4.13	24.24%
9	1997	90	3.67	27.27%
10	2007	84	3.30	30.30%
11	1993	82	3.00	33.33%
12	1990	77	2.75	36.36%
13		76	2.54	39.39%
14		74	2.36	42.42%
15		74	2.20	45.45%
16		73	2.06	48.48%
17		71	1.94	51.52%
18		70.4	1.83	54.55%
19		70	1.74	57.58%
20		70	1.65	60.61%
21		70	1.57	63.64%
22		69	1.50	66.67%
23		65	1.43	69.70%
24		65	1.38	72.73%
25		62	1.32	75.76%
26		60	1.27	78.79%
27		60	1.22	81.82%
28		57.8	1.18	84.85%
29		45	1.14	87.88%
30	2010	42.8	1.10	90.91%
31	2009	32.5	1.06	93.94%
32	1979	30.5	1.03	96.97%

A partir de la función de probabilidad Gumbel, se obtuvo la serie de valores extremos para diferentes periodos de retorno. Se observa que la serie de datos tiene un comportamiento doble o bimodal. Se deduce a partir de los datos extremos de la muestra que corresponden a eventos ciclónicos. Se recomienda generar un nuevo análisis de los datos con una serie doble o bivariada (para dicho análisis es necesario tomar en cuenta una regionalización de datos de lluvias).

Tabla 6-5 Resultado del análisis estadístico a partir de la función de distribución de probabilidad, Gumbel.

T	$F(x)=1-1/T$	$1/T$	V	Ut	Xt estimador (m ³ /s)
2	0.5000	0.5000	1.1774	-1.1774	72.99
5	0.8000	0.2000	1.7941	1.7941	103.42
10	0.9000	0.1000	2.1460	2.1460	123.57
20	0.9500	0.0500	2.4477	2.4477	142.89
50	0.9800	0.0200	2.7971	2.7971	167.91
100	0.9900	0.0100	3.0349	3.0349	186.65
200	0.9950	0.0050	3.2552	3.2552	205.33
500	0.9980	0.0020	3.5255	3.5255	229.97
1,000	0.9990	0.0010	3.7169	3.7169	248.59
2,000	0.9995	0.0005	3.8989	3.8989	267.20
5,000	0.9998	0.0002	4.1273	4.1273	291.81
10,000	0.9999	0.0001	4.2919	4.2919	310.42

Donde, Xt es la precipitación calculada para dichos periodos de retorno T. Se remarca el valor de diseño (100 años) y la precipitación de diseño $h_p = 186.65$ mm

Tabla 6-6 Resumen de datos de lluvias a diferentes periodos de retorno

T	hp
2	72.99
5	103.42
10	123.57
20	142.89
50	167.91
100	186.65
200	205.33
500	229.97
1,000	248.59
2,000	267.20
5,000	291.81
10,000	310.42

Para conocer las características fisiográficas de las microcuencas se hizo uso de la cartografía. Se midieron las áreas de captación, longitud del cauce principal, diferencia de alturas y se determinó la pendiente del cauce a partir del método de Taylor schwarz. Posteriormente se calculó el tiempo de concentración con la ecuación de Kirpich. A continuación se presentan los resultados de un par de cuencas.

Tabla 6-7 características fisiográficas

Presa	Parámetro					de [h]
	L [m]	tc [h]	tp [h]	Ac [km2]	qp [m³/s/mm]	
Aguadita	491.00	0.39	0.54	0.23	0.09	0.62
Zona d e Ak'	1,050.00	0.69	0.83	0.47	0.12	0.83
Sc	0.0025					
hp	186.65	mm				
Presa	Aguadita	Zona d e Ak'				
Ce	0.23	0.24				
hpe [mm]	42.14	45.45				

Se prosigue al diseño de la obra de excedencias para cada presa. Se utilizaron varios métodos, pero el más conveniente es el que utiliza Barry Lewis basado en WAWA (Water Authority of Western Australia), ya que toma en cuenta las especificaciones de nuestro tipo de embalses (vegetación en el humedal u obra de excedencias). Este método especifica el ancho mínimo requerido a la entrada del vertedor y a la salida dependiendo de la altura del agua desde la cresta del vertedor y de la pendiente del terreno después del vertedor, como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 6-8 características del vertedor para diferentes gastos máximos.

Presa	Q _{máx}	Q _{acumulado}	Área [km²]	Gasto de diseño, [m³/s]	Mínimo			Mínimo								
					Depth of flow [m]			Depth of flow [m]			Return Slope [%]					
					0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	3	4	5	7	10	
Inlet width [m]			Width [m]			Outlet width [m]										
Tierra colorado bajo	7.18	7.18	m³/s	1.08	7.5	29	18.5	13	28.277	18.366	13.14	10.0	11.0	15.0	19.5	25.5
A. Escondida	2.71	2.71	m³/s	0.19	2	7.0	5.0	4.0	10.66	6.92	4.95	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Tierra colorada alto	5.54	5.54	m³/s	1.08	3.5	13.0	8.5	6.0	21.81	14.16	10.14	6.0	6.0	7.0	9.0	12.0
UAIM	4.28	11.46	m³/s	1.08	3	11	7	5	45.131	29.313	20.97	6.0	6.0	6.0	8.0	10.0
Aguada Wüiro	6.43	6.43	m³/s	0.71	4.5	17	11	7.5	25.321	16.446	11.77	6.0	7.0	9.0	11.5	15.5
Bordo mecanizado	11.31	11.31	m³/s	0.43	7.5	29	18.5	13	44.528	28.922	20.69	10.0	11.0	15.0	19.5	25.5
Olla de Guadalupe	6.23	6.23	m³/s	0.14	4.5	17	11	7.5	24.511	15.92	11.39	6.0	7.0	9.0	11.5	15.5

El diseño del vertedor es básicamente un canal muy ancho con pendiente de entre 3 y 10% de entrada y de salida con una parte central más alta. Esto permite que el volumen de una avenida sea liberado con suavidad y lentitud para evitar erosión. Normalmente están vegetados de pasto y plantas de humedal.

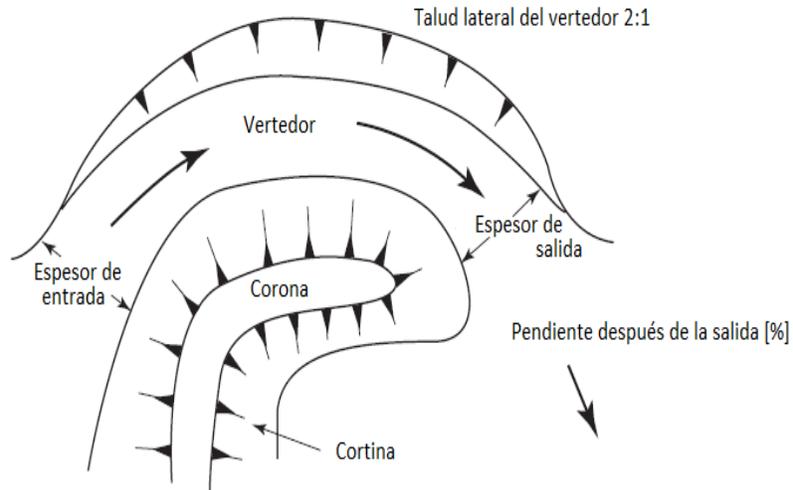


Figura 6-18 Diseño de vertedores

7. Análisis agrícola (agua en el suelo)

Debido a la escasez de agua y a las exigencias en conflicto para la reserva limitada de agua disponible, hay una necesidad creciente de regar lo más eficazmente posible. Esta situación destaca la necesidad de emplear métodos científicos probados para decidir cuándo regar los cultivos y en qué cantidad. Por desgracia, gran parte del regadío se basa aún en métodos empíricos y no en las relaciones hídricas entre suelo, plantas y atmósfera. Según Taylor (1985), “la irrigación debería efectuarse mientras el potencial hídrico del suelo es todavía lo suficientemente elevado para que el suelo pueda proporcionar agua –y lo haga— con rapidez suficiente para satisfacer las demandas atmosféricas locales sin imponer a las plantas una tensión que reduzca el rendimiento a la calidad de la cosecha”.

La facilidad para cultivar el suelo y la cantidad de agua necesario para el desarrollo radicular de las plantas dependerá principalmente de la textura.

El suelo es el principal medio de almacenamiento de agua y nutrientes que necesitan las plantas para su desarrollo. El correcto desarrollo de las plantas dependerá de la justa cantidad que la planta necesite en sus diferentes etapas de crecimiento, por lo tanto en cultivos agrícolas, la producción estará directamente relacionada a cubrir con las necesidades de la especie para sus diferentes etapas. El agua se adhiere a las partículas de suelo por las fuerzas de atracción entre los átomos de hidrógeno del agua y los átomos de oxígeno de las superficies minerales del suelo o de otras moléculas de agua, manteniendo al agua en contra de la fuerza de gravedad. Dichas fuerzas ocasionan que se formen finas capas de agua, que dependiendo las características del suelo será su espesor y por lo tanto el volumen máximo a almacenar.

Las fuerzas de atracción superficial con las cuales las moléculas de agua son retenidas, dependerán de la cantidad de superficie de contacto que tenga el suelo, así, entre más arcilla y materia orgánica, mayor es la cantidad de agua retenida. La fuerza (cohesión -adhesión) con la que el agua es retenida, se puede cuantificar como la fuerza necesaria para extraer el agua del suelo y se conoce como *tensión*. Para un mejor manejo de unidades y dimensiones, las fuerzas de retención son medidas en unidades de presión (bares, Joules/kg, m de agua, etc). Entendiendo que la tensión en los suelos es la fuerza de atracción del agua con el suelo, las películas de agua son retenidas con diferente magnitud, por lo cual, mientras más agua tenga contenga un suelo, menor será la tensión para removerla.

El ciclo vegetativo comprende el periodo de crecimiento de las plantas desde la siembra hasta la cosecha, se puede dividir en germinación, crecimiento, floración y madurez. La duración del ciclo vegetativo depende del tipo de planta, variando desde 4 a 7 meses en el maíz o 6 ó 7 meses para el algodón.

a) Infiltración

La velocidad a la que el agua percola o se filtra por el suelo es normalmente mucho mayor al principio de un riego o lluvia, que varias horas después, esto debido a las propiedades del suelo y por el gradiente hidráulico. La disminución de la velocidad de filtración a medida que transcurre el tiempo (curva de secado del suelo) después del humedecimiento de un suelo, es de gran importancia para conocer el correcto caudal de regado sin crear desperdicios, ya sea al subsuelo o en el escurrimiento.

En suelos arenosos, de textura gruesa o gravas, muchas veces el agua de riego o lluvia, percola tan rápido hacia el interior, que la superficie del agua puede descender varios centímetros en una hora. En los suelos arcillosos de textura fina, se acumulará y permanecerá o escurrirá el agua con muy poca filtración aparente durante muchos días. Entre éstos valores se encuentran los ideales de la velocidad de infiltración. El modo y por lo tanto la velocidad en el que se realice un riego sobre un campo agrícola será limitado por la velocidad de infiltración del suelo, con el fin de otorgar la dosis adecuada a las plantas sin desperdiciar agua por percolación profunda.

La velocidad de infiltración del agua a través de un suelo, aplicando la ecuación de Darcy es la siguiente:

$$V = K \frac{h_L}{L}$$

K = Coeficiente de permeabilidad

$\frac{h_L}{L}$ = pendiente de la línea piezométrica

... 7.1

Siempre que el régimen no sea turbulento.

La sola presencia del agua en el suelo hace que decrezcan las fuerzas de atracción entre las partículas de una arcilla. En general el aumento en el contenido de humedad reduce la resistencia de los suelos de partículas finas. En la mayoría de las regiones del mundo se produce una marcada variación de humedad conforme a las estaciones del año que se refleja en cambios en las propiedades de los suelos. Muchas de las obras de ingeniería alteran los niveles freáticos, circunstancia que debe tomarse en cuenta.

b) Evapotranspiración

La cantidad de agua consumida sin posible recuperación, para que las plantas cultivadas se desarrollen completamente y maduren su cosecha; agua empleada por las plantas para transpirarla o acumularla en sus tejidos en diversas combinaciones, suspensiones o soluciones; o el agua que es evaporada a la atmósfera directamente desde el suelo y que no puede conservarse o recuperarse, así el uso consuntivo del agua para un período de tiempo considerado, será la cantidad promedio empleada por un cultivo entre riegos normales.

Uso del agua por la planta = Agua usada en la construcción de tejidos + transpiración + evaporación

También se utiliza el término evapotranspiración para denominar los dos últimos conceptos, considerando que son los más importantes, ya que el 99% del consumo del agua por la planta se debe a ellos.

A la evapotranspiración o uso consuntivo, también se puede definir como la cantidad de agua (en lámina o por ciento) que un cultivo pierde por los efectos de evaporación de agua del suelo y el de transpiración de las plantas para el desarrollo normal de las plantas.

La definición se refiere al potencial que tiene un cultivo a perder agua sin la restricción del almacenamiento de agua en el suelo y llevar la humedad a cero. La evapotranspiración real toma en cuenta la limitante de la humedad del suelo.

La transpiración es el proceso por el cual el vapor del agua se desprende de las plantas vivas, principalmente de las hojas y pasa a la atmósfera. Debido a que la cuantificación del agua transpirada por las plantas es muy difícil de calcular sin considerar la evaporación del suelo, se optó por denominar como evapotranspiración al agua usada, evaporada y transpirada por las plantas y el suelo.

Durante el proceso de desarrollo de un cultivo, hay un continuo movimiento del agua de riego que pasa desde el suelo al interior de las raíces, sube por los tallos y sale por las hojas de la planta. La velocidad de movimiento del agua a través de las plantas es muy variado, de 0.3 a 1.8 metros por hora, en condiciones normales. Factores como la temperatura, clima seco, o viento, pueden aumentar considerablemente éstos valores. Se ha observado que la planta retiene solo una pequeña parte del agua que absorben las raíces.

Los factores que intervienen en la variabilidad del uso consuntivo o evapotranspiración de las plantas dependen de diversos factores, en su mayoría determinantes del desarrollo vegetativo. Las influencias naturales más importantes son; el clima, la provisión de agua, los suelos y la topografía. Los factores climáticas que más afectan son; la precipitación, la temperatura, la radiación solar, la humedad, el movimiento del viento, duración de la etapa de crecimiento, latitud y luz solar.

El suelo; el tipo de textura, estructura, fertilidad, salinidad, capacidad de retención de agua, profundidad y nivel freático.

Los tipos de cultivo; la especie, variedad, duración del ciclo vegetativo, fase de desarrollo, fisiología.

Agua; disponibilidad, prácticas de riego y su eficiencia de aplicación.

Clima; La temperatura, fotoperiodo, calor aprovechable, precipitación, humedad del aire, vientos, nubosidad.

Condiciones del lugar; Es sabido que el uso consuntivo varía entre las regiones húmedas y las desérticas. Aún en zonas cercanas a sitios desérticos se registran altos niveles del uso consuntivo, esto debido al transporte de aire caliente por los vientos a las zonas de riego. Por otro lado, los terrenos de cultivo que se encuentran en sitios donde los vientos predominantes provienen de zonas húmedas pantanosas pueden tener un uso consuntivo relativamente bajo.

Humedad; La evaporación y la transpiración aumentan en días de baja humedad y disminuyen durante periodos de humedad alta por la variación del esfuerzo de tensión en el proceso de extracción de agua por parte de las plantas.

Influencia del viento; La evaporación del agua de la superficie del suelo y de las plantas, se efectúa más rápidamente cuando hay aire en movimiento que cuando se presentan condiciones bajo aire en calma. Vientos inusitados, con condiciones de humedad o temperatura extremas incrementan la cantidad de agua consumida. Además los factores listados anteriormente tiene influencia entre si y no actúan independientes. Otros factores es el área foliar de las plantas y las necesidades fisiológicas de las plantas en general.

Habrà un límite en el cual la cantidad de agua que puede perderse en la evapotranspiración, puesto que, en el momento que se seca la superficie del suelo, la evaporación se detiene prácticamente y la transpiración es restringida por la capacidad de la vegetación para extraer y conducir la humedad del suelo a través de sus tejidos.

Durante mucho tiempo los investigadores han estudiado el proceso de la evapotranspiración y la medida en que la temperatura, humedad, velocidad del viento, presión de vapor y la radiación solar influyen en sus valores. Entre los investigadores más sobresalientes se encuentran: el Dr. C. W. Thornthwait, Harry F. Blaney y W. D. Criddle.

Métodos directos para la obtención del uso consuntivo:

- Lisímetro
- Integración
- Entrada y consumo de agua
- Aerodinámico
- Dalton
- De balance de energía
- Combinados

Métodos indirectos para la obtención del uso consuntivo:

- Thornthwaite*
- Blaney y Criddle*
- Penman
- Crassi – Christiansen
- Racional
- Lowry y Johnson
- Turc

Método de Thornthwaite

Con el fin de encontrar una expresión simple que empleara datos climáticos accesibles, desarrolló una fórmula empírica basada en la latitud y temperatura para obtener valores estimados de la evapotranspiración de un lugar en específico.

$$E_t = 1.6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad \text{Ecuación 7.2}$$

E_t = Evapotranspiración mensual en cm

T = temperatura media mensual en °C

a = constante que depende del lugar y que es función del índice de eficiencia anual de temperatura (I)

$$a = 0.000000751I^3 - 0.0000I^2 + 0.01792I + 0.49239$$

I = índice anual de calor (medido como temperatura). Es la suma de los índices de las eficiencias mensuales de temperatura (i)

$$I = \sum_{i=1}^{12} i; i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad \dots 7.3$$

Aplicación del método:

- 1 Se calculan las temperaturas medias mensuales (T)
- 2 Se calculan los valores de las eficiencias mensuales de la temperatura, con la expresión:

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad \dots 7.4$$

- 3 Se determina la eficiencia anual de la temperatura, sumando los valores calculados
- 4 Se calcula el exponente "a" aplicando la fórmula:

$$a = 0.000000751I^3 - 0.0000I^2 + 0.01792I + 0.49239 \quad \dots 7.5$$

- 5 Se estima la evapotranspiración en el mes considerando en función de la temperatura media mensual aplicando la fórmula:

$$E_t = 1.6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad \dots 7.6$$

Esta fórmula de la evapotranspiración se puede encontrar directamente de tablas.

Método de Blaney Cridle:

La ecuación propuesta determina el uso consuntivo en períodos mensuales, basándose en la temperatura media mensual, el porcentaje de horas luz y el tipo de cultivo mediante un coeficiente K_c , que se obtiene mediante tablas. Dicho coeficiente tiene valores mensuales para cada tipo de cultivo, además se puede ver de manera general para determinar las necesidades de agua de manera general.

La fórmula fue calibrada para climas y regiones del oeste de Estados Unidos, para utilizarla en otras regiones es necesario hacer algunas correcciones.

Tabla 7-1 Coeficiente de cultivo Kc

Cultivo	Ciclo vegetativo (días)	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5
Maíz	150	0.580	0.920	1.080	1.000	0.860
Frijol:						
verano	120	0.800	1.120	0.960	0.600	
invierno	140	0.750	1.060	1.100	0.840	0.600
Trigo (inv.)	150	1.480	1.480	1.390	1.000	0.600
Cebada (inv.)	150	0.560	1.270	1.620	1.320	0.600

La ecuación es:

$$UC = \sum_{i=1}^N Kc_i P_i \left(\frac{t+17.8}{21.8} \right) kt_i \quad \dots 7.7$$

Donde:

UC es el uso consuntivo mensual, en cm

P_i el porciento de horas mensuales de luz

T temperatura media mensual, en C°

Kc coeficiente de cultivo (mensual)

I índice para cada uno de los meses del ciclo vegetativo, 1 para siembra y N para cosecha

Kt_i corrección para zonas aridas y semi-áridas, $kt_i = 0.03114t_i + 0.2396$

Resultados para la región del Naranjal para un cultivo de maíz con un periodo de 150 días. (valores en mm)

Tabla 7-2 Uso consuntivo. Valores en cm

Maíz invierno					
i	Temperatura	kc _i	P _i	kt _i	uc
1	21.6	0.58	7.79	0.91	7.45
2	22.6	0.92	7.28	0.94	11.71
3	24.2	1.08	8.41	0.99	17.38
4	26.3	1.00	8.51	1.06	18.22
5	27.1	0.86	9.11	1.08	17.48
6	27.1				
7	26.8				
8	26.8				
9	26.7				
10	25.4				
11	23.7				
12	22.4				

UC 53.09

Maíz invierno					
i	Temperatura	kc _i	P _i	kt _i	uc
1	21.6				
2	22.6				
3	24.2	0.58	8.41	0.99	9.33
4	26.3	0.92	8.51	1.06	16.77
5	27.1	1.08	9.11	1.08	21.96
6	27.1	1.00	8.97	1.08	20.02
7	26.8	0.86	9.20	1.07	17.39
8	26.8				
9	26.7				
10	25.4				
11	23.7				
12	22.4				
					UC 159.71

Es el método más utilizado en México y por tanto el más probado.

De toda el agua que absorben las plantas, más o menos el 95 por ciento lo pierden por transpiración y 5 por ciento o menos se utiliza dentro de la planta. De no ser por la pérdida de agua por transpiración, un poco de lluvia o de riego bastaría para suministrar el agua suficiente al crecimiento de toda una cosecha.

c) Riego: Simulación de cultivos

Hay tres enfoques generales para la determinación del momento conveniente para irrigar. Un método consiste en medir el contenido hídrico del suelo, el segundo, en medir el contenido hídrico o la tensión hídrica de la planta, y el tercero, en medir la evaporación y calcular la necesidad de agua de un cultivo.

Medidas de agua del suelo. El método tradicional para determinar la necesidad de irrigación consiste en excavar y decidir, por la apariencia del suelo y el "tacto", si habrá que echarle agua.

Así pues, la única indicación del estado del agua en el suelo en términos de crecimiento de las plantas es su potencial hídrico. El potencial mátrico del suelo puede medirse directamente con tensiómetros hasta aproximadamente — 0.8 bario, lo cual cubre los límites del mejor crecimiento de la mayoría de los cultivos vegetales

El suelo, además de estar conformado por partículas minerales, tiene una porción de poros que normalmente están llenos de aire cuando el suelo está seco, al momento que el suelo se va humedeciendo, los poros se llenan de agua, al momento que los poros se llenan completamente de agua, el suelo se encuentra en estado de saturación. Debido a la acción de la gravedad o bien de otras fuerzas, al estar el suelo completamente húmedo, el exceso de agua escurrirá libremente.

Entre el estado del suelo seco y un suelo saturado, existe una variación en el contenido de humedad, expresado normalmente en porcentaje respecto al peso del suelo seco; es decir, la relación de peso de agua contenida a peso de suelo seco multiplicada esta relación por cien.

El procedimiento para obtener la humedad del suelo con un método directo es: Perforar hasta la profundidad deseada con una barrena, extraer las muestras de suelo húmedo y colocarlas en botes con tapa y sellarlos, llevarlos al laboratorio para su posterior desecación y pesado. Las muestras de suelo húmedo de 100 gramos o más, se colocan en hornos a una temperatura de 105° a 110° C, hasta que el suelo quede exento de humedad.

$$P_s = \frac{PSH - PSS}{PSS} \times 100$$

P_s = porcentaje de humedad respecto al peso del suelo seco

PSH = peso del suelo húmedo

P_a = peso del agua contenid

... 7.8

En los laboratorios también es posible estimar el contenido de humedad de un suelo a partir de métodos de centrifugación, crioscopía o conductividad eléctrica.

Un método práctico para estimar el contenido de humedad de un terreno es a partir de una inspección ocular y su tacto.

Por otro lado, en la región existe un grave daño por agua en exceso en los cultivos, donde el anegamiento del suelo en zonas bajas y donde capas impermeables interfieren con el desagüe causa frecuentemente daños extensivos a los cultivos. Además, incrementa la acumulación de sal la superficie del suelo. Un desagüe conveniente de las tierras regadas es tan importante como un abastecimiento adecuado en agua de buena calidad.

Capacidad de campo:

Es el contenido de humedad de un suelo expresado en por ciento (P_s), después de un riego pesado o una lluvia intensa, una vez que se ha eliminado el exceso de agua por acción de la fuerza de gravedad. Esta condición se obtiene dos días después del riego. Esta constante de humedad depende fundamentalmente de la textura, estructura y grado de compactación.

En el campo se puede determinar la capacidad de campo después de un riego, tomando como muestras diarias y determinando su porcentaje de humedad con respecto al peso del suelo seco (P_s), hasta que más o menos permanezca constante; de forma numérica se expresa:

$$\frac{dP_s}{dt} \rightarrow 0$$

Para estimaciones burdas, en función de la textura obtener un valor aproximado de la capacidad de campo. También se puede uno valer de la tabla siguiente:

Tabla 7-3 Capacidad de campo por tipo de textura en el suelo

Texturas	Capacidad de campo %
Arenas	5 a 15
Migajones arenosos	10 a 20
Suelos francos	15 a 30
Migajones arcillosos	25 a 35
Arcilla	30 a 70

Porcentaje de marchitamiento permanente:

Es el contenido de humedad de un suelo, cuando las plantas se marchitan permanentemente y corresponde al límite inferior de la humedad aprovechable por los vegetales. Una planta se marchitará cuando no es capaz de seguir obteniendo humedad suficiente para hacer frente a sus necesidades hídricas.

El marchitamiento permanente, depende del agua utilizada por las plantas, de la profundidad de la zona radicular y de la capacidad de retención de agua del terreno.

De manera general se puede evaluar de una forma general el P.M.P. utilizando la siguiente tabla que compara la textura y el porcentaje de P.M.P.:

Tabla 7-4 Punto de marchitamiento permanente por tipo de textura en el suelo

Textura	Porcentaje de marchitamiento permanente
Arenas	3 a 18
Migajones arenosos	6 a 12
Suelos francos	8 a 17
Migajones arcillosos	13 a 20
Arcillas	17 a 40

Humedad aprovechable:

La humedad aprovechable por las plantas es la diferencia entre la capacidad de campo y el porcentaje de marchitamiento permanente, es decir a capacidad de campo la humedad aprovechable al 100% y a punto de marchitamiento será 0%

Por lo tanto, la lámina máxima que podemos aplicar para humedecer un suelo a una profundidad P_r , sin desperdiciar agua es:

$$L = (PS_{cc} - PS_{mpm}) \times D_a \times P_r$$

PS_{cc} = Porcentaje de huemdad a capacidad de campo

PS_{mpm} = porcentaje de marchitamiento permanente ... 7.9

P_r = profundidad radicular

La pérdida diaria de agua por transpiración excede frecuentemente del contenido hídrico de una planta. Por ejemplo, una planta de maíz puede perder de 2 a 4 litros de agua en un día caluroso de verano, o dos veces el peso del agua que encierra. Si la mayor parte de la pérdida de agua no fuera inmediatamente reemplazada, las plantas que transpiran rápidamente morirían por desecamiento en un solo día.

Como se ha manifestado anteriormente, el agua fácilmente disponible para las plantas suele estar designada como la que existe entre los límites de la capacidad de campo y porcentaje de agostamiento permanente.

La cantidad de agua disponible varía muchísimo de un suelo a otro. El almacenamiento de agua fácilmente disponible por 30 cm de profundidad varía entre 4.3 y 8.6 mm en arena fina hasta 77.0 mm en una arcilla.

La limitación de la capacidad de almacenamiento de agua adquiere particular importancia para las plantas de raíces superficiales o las que crecen en suelos de

poca profundidad bajo los cuales se extienden estratos rocosos o duros, impermeables a las raíces.

Modelo de Flinn:

Haciendo uso de datos del Instituto de Ingeniería sobre las características de un suelo de la región de la península de Yucatán, suelo tipo Box lu' um, suelo arcilloso con alto contenido de carbón se realiza una simulación del cultivo para determinar la humedad del suelo a lo largo del ciclo vegetativo y determinar las necesidades de riego.

Los datos son los siguientes:

El sitio de análisis se encuentra dentro de la Reserva de la Biosfera de Calakmul, con nombre "Modesto Ángel" el punto geográfico longitud 18°36'46" y latitud 89°17'23"

Tabla 7-5 Características físicas del suelo en el punto de control Modesto Ángel.

Profundidad [cm]	Hmg [%]	pH	CE [uS/cm]	Dap [g/cm ³]	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]
10	39.9	6.90	249	1.49	10.8	10.0	79.2
20	37.5	6.80	104	1.59	8.4	12.0	79.6
30	35.7	6.80	76	1.62	4.8	12.0	83.2
40	32.8	6.80	72	1.61	16.7	6.0	77.3
50	30.8	6.90	68	1.72	20.8	6.0	73.2
60	33.4	7.10	66	1.57	14.7	10.0	75.3
70	31.1	7.60	94	1.73	11.8	10.0	78.2
80	29.5	7.90	92	1.68	12.5	8.0	79.5
90	31.7	8.00	88	1.54	12.8	8.0	79.2
100	28.2	8.10	87	1.73	12.8	8.0	79.2
110	32.2	8.30	91	1.47	12.8	8.0	79.2

Hmg= humedad gravimétrica.

pH= potencial de hidrógeno.

CE= conductividad eléctrica.

Dap= densidad aparente.

Tabla 7-6 Resultados de laboratorio para la muestra de Modesto Ángel

MUESTRA DE LABORATORIO	PROFUNDIDAD EN cm	HUMEDAD DE CAMPO %	CAPACIDAD DE CAMPO %	PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE %
19	M _{0-2.5}	22.43	64.21	46.29
20	M _{2.5-5}	25.76	64.11	46.00
21	M ₅₋₁₀	36.88	60.03	43.03
22	M ₁₀₋₂₀	36.84	68.57	46.45
23	M₂₀₋₃₀	37.61	65.88	44.86
24	M ₃₀₋₄₀	36.09	63.03	42.05
25	M ₄₀₋₅₀	35.69	55.45	36.20
26	M ₅₀₋₆₀	34.83	58.91	38.56
27	M ₆₀₋₇₀	32.71	56.90	36.85
28	M ₇₀₋₈₀	32.25	59.23	37.95
29	M ₈₀₋₉₀	34.22	61.89	41.79
30	M ₉₀₋₁₀₀	34.02	65.47	43.01
31	M ₁₀₀₋₁₁₀	35.18	63.08	43.97

Utilizando una regresión de tipo paramétrica con la expresión $\psi = \frac{a}{W^b} + c$, en donde ψ es la tensión en j/kg, W la humedad en por ciento y a, b y c son parámetros para la obtención de la curva de secado del suelo.

HUMEDAD PARA APLICAR RIEGO			201.4	mm		
			201.4			
1 bar=10m= 100j/kg					a=	5.62E+09
	j/kg	bars	W %		b=	4.68
PMP	1500.0	15	25.01		c=	-109
CC	33.33	0.3	42.00			
						$\psi =$
germinación y floración	50	0.5				
madures	1000	10				
		Wi	42.00	%		
		ten i	33.33	j/kg		
		Li	265.0	mm		

	mes	Abril				septiembre					
1999	Días	1	2	3	4	149	150	151	152	153	154
lámina de lluvia	hp mm	0	0	0	0	3	0	5	0	5	32
	corrección	-	-	-	-	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.0
Número de curva corregido	Nc	-	-	-	-	45.7	45.7	45.7	45.7	45.7	83.0
sortividad	S	-	-	-	-	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
lámina de escurrimiento	Q	0	0	0	0	1.2	2.6	0.6	2.6	0.6	6.3
lámina de infiltración	Y	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	4.4	0.0	4.4	25.7
1999	Eo	5.96	6.1	5.8	6.1	0.57	2.62	1.42	3.32	1.88	2
coeficiente de cultivo	Kc	-	-	-	-	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86	0.86
Evapotranspiración	Etp					0.5	2.3	1.2	2.9	1.6	1.7
Lámina inicial	L _i	265.0	265.0	265.0	265.0	261.6	262.9	260.6	263.7	260.8	263.3
Riego	r	156				0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Suma de láminas	Σh	264.95	265.0	265.0	265.0	263.4	262.9	265.0	263.7	265.0	265.0
Humedad	W	42.00	42.0	42.0	42.0	41.8	41.9	41.7	41.9	41.7	41.9
Tensión	ψ	33.3	33.3	33.3	33.3	36.8	35.4	37.8	34.6	37.6	35.0
Evaporación real	Ea	0	0.0	0.0	0.0	0.5	2.3	1.2	2.9	1.6	1.7
Lámina final	L _{i+1}	264.95	265.0	265.0	265.0	262.9	260.6	263.7	260.8	263.3	263.2
Realción	Ea/Etp					1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Desarrollo Diario	P					1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

A partir de la información se determinaron los días con necesidad de riego (sólo 2 en ese caso) y la producción esperada 90% del óptimo, a partir de la relación de la evapotranspiración y de la evaporación potencial. Además se calculó la dosis necesaria para establecer las condiciones de humedad deseadas y por lo tanto el volumen de agua total. Se observa la necesidad de obtener las propiedades exactas de cada suelo y los coeficientes de las variedades de cultivo de la región.

A partir de un ejercicio para obtener el balance entre la demanda de agua de los cultivos y la disponibilidad en los cuerpos de agua se determina que para las condiciones en las que se desarrolló la simulación se podrá regar 30 ha de maíz con un cuerpo de agua.

A partir de un análisis de carbón en el suelo se podrá determinar cómo se reduce la demanda de riego aumentando un cierto porcentaje de carbón (materia orgánica).

Al analizar los primeros resultados se observa que las necesidades de agua de los cultivos son muy variables y la determinación de las propiedades del agua es esencial.

Ver resultados del análisis en el Apéndice 4.

8. Anteproyecto y análisis de indicadores económicos

a) Beneficios y costos

Los beneficios se ven reflejados como un aumento en la productividad de los cultivos. Utilizando al maíz como el cultivo de referencia, se identificó que el rendimiento óptimo para el tipo de maíz es de 10 toneladas por cada hectárea. Sin embargo en campo se reportan rendimientos por debajo de 3 toneladas por hectárea. Con el plan propuesto los rendimientos deberían acercarse bastante a los óptimos.

Por otro lado, se hizo un análisis general de los costos más importantes para la construcción de dichos bordos de almacenamiento.

Tabla 8-1 Conceptos y precios para la construcción de un bordo de almacenamiento

Concepto	Descripción	unidad	P.U. 2014	P.U. 2016
Despalme y limpieza del terreno	Despalme con maquinaria en material b a 20 cm de profundidad (caterpillar D7)	\$/m ²	17.85	29
Movimiento de tierra y compactación de bordos	Terraplénde prestamo lateral aguas arriba (formación y compactación 85% proctor)	\$/m ³	60	222
Excavación	Excavación en prestramo lateral, material c	\$/m ³	28.82	46
Compactación de membrana de tierra	aproximado	\$/m ³		200

Tabla 8-2 Costo de construcción aproximado de cada una de las obras seleccionadas por cada uno de los 6 ejidos en la REP SERAM

Ejido	paraje	tipo de obra	Área de despalme	Área de espejo de agua	Volumen de bordo	Volumen de excavación	Volumen de membrana del fondo	P.U.				Costos				Costo total	Costo más 35% por ajustes	Costo de la obra por m2
								Despalme y limpieza del terreno	Movimiento de tierra y compactación de bordos	Excavación	Compactación de membrana o liner	Despalme	Bordo	Excavación	Membrana			
El Naranjal	Olla de Guadalupe (más restauración de aguada)	Bordo de silla	14,850	13,500	4,065	8,242	4,455	29	222	46	200	424,116	902,430	380,044	891,000	2,597,590	\$ 3,506,745.93	\$ 259.76
Dos Aguadas	Álamo Alto (más jagüey)	Bordo de valle	2,200	2,000	500	3,600	660	29	222	46	200	62,832	111,000	166,003	132,000	471,835	\$ 636,977.52	\$ 318.49
San Cristóbal	Aguadita	Restauración	36,300	33,000	0	16,500	10,890	29	222	46	200	1,036,728	0	760,848	2,178,000	3,975,576	\$ 5,367,027.60	\$ 162.64
San Miguel	Pucté 2	Cisterna de tierra	3,300	3,000	0	1,125	990	29	222	46	200	94,248	0	51,876	198,000	344,124	\$ 464,567.40	\$ 154.86
Piedras Negras	Limonos/Kutz	Bordo de valle	10,120	9,200	1,930	0	3,036	29	222	46	200	289,027	428,460	0	607,200	1,324,687	\$ 1,788,327.72	\$ 194.38
Plan de la Noria Poniente	Aguada Naranjal	Restauración/bordo	56,320	51,200	1,255	10,240	16,896	29	222	46	200	1,608,499	278,610	472,187	3,379,200	5,738,496	\$ 7,746,969.71	\$ 151.31
																	\$ 19,510,615.88	TOTAL

9. Conclusiones

Al existir un volumen de almacenamiento de agua superficial (con fácil disponibilidad), es posible atender los sistemas agrícolas con un riego oportuno, de tal manera que los productores tengan asegurada su cosecha, por lo menos en cuanto a necesidades de agua.

A partir del DHC se generan nuevos escenarios de hidratación del paisaje, donde se aumente el carbono en los suelos, se disminuye la pérdida de suelos, se aumenta la productividad agrícola y como resultado: merma el estrés hídrico de la región.

Esto a su vez promueve una apropiación de los paisajes rurales por las nuevas generaciones y trasciende la realidad de agricultura temporal a las posibilidades de una agricultura de riego a diferentes escalas en un paisaje rehidratado, de un manejo y aprovechamiento de sus recursos naturales que fomenta el sustento y la identidad, y como consecuencia el arraigo. Además, teniendo en cuenta las escalas de intervención, la rehidratación del paisaje genera microclimas locales y adaptación a los fenómenos extremos generados por el cambio climático.

Es una estrategia para mitigar de manera local los efectos del desorden climático que se observa en los últimos años y promover la humedad del suelo y el ambiente, estimulando la evapotranspiración y de ésta manera hacer una barrera contra los vientos y nubosidad que entran por el sureste del país. Reteniendo la nubosidad y de ésta manera se espera generar más lluvia.

Por falta de mediciones e investigación, el aprovechamiento del agua superficial en la región no se ve como una oportunidad para abastecimiento. Es por esto que el presente estudio pretende determinar los volúmenes de escurrimiento en exceso y la oportunidad de almacenar en cuerpos de agua superficial con el fin de abastecer las zonas de cultivo y aumentar la disponibilidad de agua.

Un indicador importante en el suelo es la cantidad de carbono, suelos con poco carbono orgánico, son suelos deshidratados con poca capacidad de almacenamiento de agua y recarga de acuíferos. Mientras que suelos con altas cantidades de carbono orgánico son suelos hidratados y con buena capacidad de almacenamiento de agua y de recarga de los acuíferos. Según Jhones, C. (2006), el aumento de un 1% del volumen de carbono orgánico en los primeros 30 cm de suelo equivale a un extra de 16,8 l/ m² o 168,000 l/ha. Lo que a su vez equivale a 154 ton/ha de carbono secuestrado.

A partir del modelo de flinn se determinó que para los tres años es necesario aplicar por lo menos dos riegos y con un sistema de presas como los propuestos se estima que se podrán regar hasta 60 hectáreas por sistema de dos cuerpos de agua.

Por otro lado los rendimientos varían muy poco y con la información generada no se determina la mejoría de la productividad a partir del riego.

Tabla 9-1 Costos y proyección de beneficios por ejido y cuerpo de agua

RESUMEN Y COSTO DE OBRAS												
ejido	paraje	tipo de obra	área espejo de agua (m ²)	volumen de almacenamiento (m ³)	costo de construcción de obra	área de captación ajustada	costo de obras de rehidratación	área de influencia aguas abajo	costo de BPA's	CO2 Ton	agua en el suelo (m ³)	total
Dos Aguadas	Álamo Alto (más jagüey)	bordo de valle	2,000	1,741.0	\$636,000	4.59	\$8,951	63.4	\$1,648,400	3,423.6	1,014.4	\$2,293,350.50
El Naranjal	Olla de Guadalupe (más restauración de aguada)	bordo de silla	13,500	6,364.8	\$3,510,000	95.60	\$186,420	139.2	\$3,619,200	7,516.8	2,227.2	\$7,315,620.00
Piedras Negras	Limones / Kutz	bordo de valle	9,200	11,020.0	\$1,794,000	193.80	\$377,910	94.0	\$2,444,000	5,076.0	1,504.0	\$4,615,910.00
Plan de la Noria Poniente	Aguada Naranjal	restauración / bordo	51,200	155,830.0	\$7,936,000	156.40	\$304,980	130.0	\$3,380,000	7,020.0	2,080.0	\$11,620,980.00
San Cristóbal	Aguadita	restauración	33,000	57,400.0	\$5,379,000	22.60	\$44,070	29.4	\$764,400	1,587.6	470.4	\$6,187,470.00
San Miguel	Pucté 2*	cisterna de tierra	3,000	4,100.0	\$465,000	4.40	\$8,580	24.0	\$624,000	1,296.0	384.0	\$1,097,580.00

Tabla 9-2 Resumen de obras seleccionadas por ejido y potencial de captación

EJIDO EL NARANJAL									
paraje	tipo de obra	área de captación		potencial de almacenamiento		accesibilidad	familias usuarias	cobertura	prioridad
		m ²	ha	m ³	litros				
Aguada Escondida	bordo de valle	187,936	188	19,639	19'638,825	difícil	10	guamil	6
Tierra Colorada Alto	bordo de valle	1'163,930	1,164	121,628	121'627,667	fácil	7	guamil	4
Tierra Colorada Bajo	jagüey excavado	2'246,968	2,247	234,802	234'802,331	fácil	7	guamil	5
UAIM	bordo de valle	1'084,752	1,085	113,354	113'353,772	fácil	7-40	cañada	3
Bordo el Mecanizado	bordo de valle	426,168	426	44,533	44'533,451	fácil	30	guamil / PSA	7
Olla de Guadalupe	bordo de silla	138,047	138	14,426	14'425,554	fácil	20	guamil	1
Aguada Wiro	restauración	705,692	706	73,743	73'742,984	fácil	30	mecanizado	2

Recomendaciones:

A partir de las experiencias vividas en la zona y al observar los resultados del análisis (funcionamientos de vaso y necesidades de agua en los cultivos) se observa que existe potencial del aumento en la productividad de los cultivos a través de la implementación de las obras descritas y haciendo uso adecuado del agua de riego.

Para hacer precisos y válidos los resultados del análisis se recomienda aumentar las mediciones en los niveles de los cuerpos de agua naturales (aguadas y lagunas) para ajustar los valores de coeficientes de escorrentía en los modelos de lluvia - escurrimiento, así como aumentar el registro de variables climáticas. Además de un análisis granulométrico de los suelos en los cultivos y la precisa determinación de los porcentajes de humedad correspondientes a la capacidad de campo y al punto de marchitamiento permanente. De ésta manera se contaría con la información suficiente para ajustar el estudio.

Por la importancia ecológica de la región, se busca promover los estudios hidrológicos y agrícolas para seguir impulsando proyectos productivos que atiendan la problemática local.

10. Bibliografía

- FAUST, B.B. El Desarrollo Rural en México y la Serpiente Emplumada: tecnología y cosmología mexicana, 2010.
- El Desarrollo Rural en México y la Serpiente Emplumada: tecnología y cosmología Maya en la selva tropical de Campeche, México. México D.F.: Fondo de Cultura Económica. 1998
- BUREAU OF RECLAMATION, UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR. Design of small dams, A water resources technical publication, US, 1987
- UADY, programa nacional contra sequías, Programa de medidas preventivas y de mitigación del consejo de cuenca península de Yucatán, versión 2014. México, noviembre 2014. (PMPMS)
- PAUL J. KRAMER, Relaciones hídricas de suelos y plantas. Una síntesis moderna. Edutex, México 1974
- “Carbon and Catchments”, “Managing the Carbon Cycle” National Forum 22-23 November 2006. www.amazingcarbon.com
- FAO, 2008. Current world fertilizer trends and outlook to 2011/12. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome.
- CAMPOS ARANDA, DANIEL FRANCISCO, Introducción a la hidrología Urbana, Editorial Libre, San Luis Potosí, México, 2010.
- FUENTES MARILES, ÓSCAR A. Y FRANCO, VÍCTOR. Estudio hidrológico para Obras de Protección, Capítulo 3 del “Manual de Ingeniería de Ríos”, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1997.
- RICHARD H. MCCUEN, hydrologic analysis and design, PRENTICE-HALL INTERNATIONAL EDITION, EEUU, 1998
- JESÚS GRACIA SÁNCHEZ, Introducción al diseño de zonas de riego y drenaje, UNAM.
- PAUL J. KRAMER, Relaciones hídricas de suelos y plantas. Una síntesis moderna, Edutex, México DF, 1969.
- CHOW, V.T., Handbook of applied hydrology. Mc Graw-Hill. New York, 1963
- APARICIO MIJARES, FRANCISCO J., Fundamentos de hidrología Superficial, Limusa, México, 1992.

Apéndice 1

Precipitación y evaporación

día	Evaporación promedio diaria (mm)												Total
	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	
1	3.2	3.4	4.5	5.0	5.8	5.2	4.6	4.5	4.1	3.3	3.3	3.5	
2	2.7	3.7	4.3	5.0	6.0	5.1	4.5	4.3	4.4	3.4	3.4	3.4	
3	3.5	3.6	4.3	4.9	5.9	5.2	3.6	4.2	4.1	4.2	3.3	3.4	
4	2.8	3.7	4.6	5.7	6.2	4.4	4.2	4.3	4.0	4.7	3.2	3.4	
5	2.8	4.1	4.5	5.3	5.4	5.1	4.8	5.0	4.0	3.0	3.1	3.0	
6	3.0	3.7	4.7	5.8	5.8	4.7	4.5	5.3	4.2	3.1	3.2	3.4	
7	3.3	3.3	5.0	5.6	5.6	4.7	4.9	4.8	4.0	3.3	3.8	3.0	
8	2.9	3.6	4.4	5.5	5.7	4.4	4.6	4.6	3.7	3.5	3.0	2.6	
9	3.1	3.3	4.7	5.6	6.2	4.7	4.9	4.6	3.8	3.6	3.3	2.9	
10	3.1	4.1	4.3	5.2	6.0	4.9	4.2	4.6	3.5	3.8	2.9	3.3	
11	3.2	3.7	4.4	5.5	6.0	4.7	4.2	4.4	4.4	3.6	3.2	3.2	
12	3.2	3.9	4.6	5.8	5.9	4.1	4.2	4.6	3.9	4.6	3.3	2.7	
13	3.6	4.2	4.6	5.7	5.8	4.3	4.5	4.4	3.9	4.5	3.0	3.0	
14	3.2	3.8	4.6	5.6	5.7	4.5	4.3	4.8	4.2	3.8	3.3	3.0	
15	3.2	3.9	4.8	5.4	5.5	4.9	4.6	4.5	4.3	3.6	3.0	2.7	
16	3.1	3.6	5.1	5.8	5.6	4.8	4.1	4.1	3.5	3.3	3.7	3.0	
17	3.2	4.2	5.6	5.3	5.8	4.6	4.1	4.9	3.7	3.9	3.2	3.2	
18	3.8	3.8	4.7	5.8	5.0	4.6	3.8	4.5	3.8	4.0	3.1	2.9	
19	2.6	3.5	4.7	5.5	5.1	4.0	4.3	4.4	4.2	3.3	3.2	2.6	
20	3.1	4.0	4.7	5.9	5.3	3.9	3.7	4.5	4.2	3.0	3.4	2.8	
21	2.7	3.9	4.6	5.5	5.4	4.1	3.6	3.9	4.2	4.0	3.2	2.7	
22	3.0	4.0	5.1	6.0	5.4	4.6	4.2	4.1	3.5	3.6	3.4	2.9	
23	3.4	4.4	4.9	5.9	5.4	4.6	3.8	3.9	3.6	3.5	3.6	2.5	
24	3.2	3.9	4.9	5.7	5.3	4.7	4.9	3.7	3.4	4.3	3.2	2.7	
25	3.2	4.3	5.4	5.9	5.3	5.0	4.0	3.5	3.5	4.2	3.7	2.7	
26	3.1	4.1	5.1	5.8	5.4	4.4	4.7	3.9	3.1	3.5	3.6	2.5	
27	3.3	4.2	5.6	5.9	5.0	4.0	4.3	4.4	3.8	4.2	2.9	3.0	
28	3.1	4.4	5.5	5.5	5.1	4.4	4.8	4.1	3.7	3.7	3.3	2.8	
29	3.2	3.8	5.2	6.1	4.5	5.3	4.2	4.2	3.9	3.7	3.4	2.6	
30	3.0		5.2	6.3	4.6	4.6	4.5	4.2	4.1	3.1	2.9	2.4	
31	3.2		5.0		5.1		4.3	4.3		3.4		2.7	
	96.8	112.1	149.4	168.7	170.9	138.6	133.8	135.2	116.6	114.4	98.2	90.5	1525.3

Se calculó la evaporación promedio diaria utilizando toda la serie de datos de la estación 23044, Adolfo López Mateos

Precipitación promedio diaria (mm)													
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
1	3.1	0.6	0.0	3.2	0.7	6.9	3.2	4.3	2.4	5.7	5.7	2.6	
2	1.3	2.5	2.7	1.6	1.9	3.0	3.6	4.0	4.0	9.7	4.2	2.4	
3	0.7	1.5	3.8	0.9	4.6	7.9	4.1	7.5	7.8	5.2	5.7	3.9	
4	0.7	0.4	0.5	0.8	0.2	8.0	4.3	7.0	5.9	5.2	4.0	2.6	
5	0.9	2.1	1.7	1.2	3.3	3.3	4.8	7.3	3.6	5.5	2.3	0.1	
6	0.6	1.2	1.5	0.9	2.5	4.3	3.9	1.8	5.6	6.5	0.8	0.0	
7	0.3	0.9	4.3	0.7	3.2	3.3	2.6	8.9	5.4	5.8	1.1	0.1	
8	0.8	1.4	2.2	1.2	0.6	4.5	5.4	8.3	7.0	3.1	2.4	2.2	
9	3.1	0.1	2.1	3.5	1.5	3.3	8.2	3.1	6.4	4.5	0.8	1.3	
10	0.6	0.5	1.2	1.0	5.9	2.1	5.1	6.9	4.6	13.0	1.8	1.9	
11	1.1	2.3	0.0	1.3	4.0	7.3	5.4	6.1	5.8	4.7	2.3	3.2	
12	0.3	0.3	2.7	0.8	3.6	5.8	1.1	6.7	4.2	8.2	1.9	3.2	
13	1.7	2.1	0.2	2.2	4.0	3.8	3.7	3.3	5.4	7.5	4.1	0.5	
14	1.5	0.6	0.9	2.1	3.0	5.7	6.6	1.7	6.1	4.2	3.1	2.2	
15	0.3	1.4	0.0	0.8	2.0	5.5	5.6	9.2	4.3	2.3	2.2	2.5	
16	0.5	1.7	3.5	1.2	3.4	5.2	5.1	8.2	11.1	5.2	4.3	0.6	
17	2.8	0.9	1.3	2.2	2.0	6.3	4.2	4.3	7.9	2.4	1.7	2.2	
18	2.2	0.4	0.7	2.8	4.7	5.5	2.8	4.2	5.5	1.1	2.8	1.0	
19	6.8	1.9	3.0	4.0	5.1	4.7	5.5	5.1	5.5	1.0	3.3	2.5	
20	0.8	0.0	1.4	1.0	2.8	1.3	5.9	5.6	10.1	3.2	3.1	0.3	
21	1.3	0.2	1.7	1.8	2.1	3.0	4.9	9.2	9.0	6.7	2.0	1.3	
22	0.8	2.1	0.3	1.0	7.8	4.7	3.6	5.6	7.8	2.0	1.2	1.5	
23	3.1	1.2	0.4	3.6	5.4	3.2	6.7	6.3	12.0	2.4	6.4	0.5	
24	4.6	2.0	0.4	5.5	6.1	4.3	3.2	6.0	6.9	3.7	4.3	1.5	
25	2.0	0.1	0.6	1.9	4.9	3.8	3.0	7.7	9.1	4.2	2.3	0.7	
26	1.8	0.2	2.3	2.0	2.0	4.9	4.3	7.3	4.4	3.8	6.9	0.5	
27	1.0	1.0	1.7	2.0	2.9	9.5	6.1	5.0	5.4	2.0	2.2	1.6	
28	3.1	2.7	4.6	4.4	6.1	4.5	6.8	5.8	9.0	2.1	2.1	0.7	
29	0.1	1.1	0.5	1.2	8.7	2.8	4.5	7.6	4.9	0.7	0.3	2.7	
30	0.8		1.5	2.0	3.5	4.5	5.2	3.7	8.8	4.2	3.0	2.5	
31	4.2		2.4		9.3		5.6	3.0		6.0		0.2	
	52.8	33.3	49.9	58.8	117.9	142.9	145.0	180.6	195.7	142.0	88.2	48.7	1255.9

Se calculó la precipitación promedio diaria utilizando toda la serie de datos de la estación 23044, Adolfo López Mateos

2005. Precipitacion diaria (mm)													
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Diciembre2
1	0	0	0	5	0	0	10	0	0	5	0	58	
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	
3	0	0	0	0	25	0	11	0	56	25	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	0	20	30	28	0	15	
5	0	0	0	0	10	0	0	0	0	21	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	
7	0	0	0	18	0	0	0	0	0	20	0	0	
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	
11	0	0	0	0	0	15.1	4	28	0	0	0	0	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	0	30	4	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0	0	6	0	0	20	0	0	
15	0	0	0	0	0	0	0	15.2	0	0	0	0	
16	0	0	38	0	0	50	29	20	28	0	0	0	
17	0	0	0	0	0	9	0	0	12	0	0	0	
18	0	0	0	0	0	0	4	15	12	0	0	0	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	0	0	0	0	0	0	10	12	0	30	0	0	
21	0	0	0	0	0	4	0	2	0	60	0	0	
22	0	0	0	0	20	4	5	2	0	0	0	0	
23	0	0	0	6	0	0	27	0	0	2	0	0	
24	0	0	0	0	20	4	0	0	0	0	0	0	
25	0	0	0	0	20.8	0	0	0	0	0	0	0	
26	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	
27	0	0	45	20	0	15	0	2	0	0	0	0	
28	0	0	0	0	0	0	0	2.5	6	0	0	0	
29	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	
30	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	
31	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	
	0	0	83	49	95.8	145.1	126	118.7	144	233	0	108	1102.6

Serie de lluvia diaria del año 2005, año del huracán Wilma, datos en mm. Durante los meses de junio a octubre se presentan continuamente depresiones tropicales y ciclones, ya que la Península se encuentra cerca de 4 regiones matrices de huracanes; el golfo de Tehuantepec, la sonda de Campeche, el Caribe oriental y la región atlántica (INEGI, 2002).

2005. Evaporacion diaria													
Dia	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1	4.8	3.5	5.7	4.4	7	4.8	2.5	5.8	5	1.5	0	5.5	
2	4.3	3.6	4.9	4	7.1	5.9	5.5	4.4	6.1	3.5	0	3.4	
3	5	3.9	4.6	4.8	7.1	5.7	2.2	5.1	1.9	2.2	0	5.2	
4	2.9	5.3	5.2	6.6	7.3	5.9	0.3	0.8	5.1	3.5	0	2.8	
5	3.1	4.8	4.7	6.8	1.6	7.5	6.2	4.4	3.7	0.8	0	3.4	
6	3.6	4	5.3	7.2	6.2	2.8	3.8	4.7	3.9	3.9	0	2.7	
7	3	4.4	6.3	7.7	6	5.7	4	5.9	5.1	4.9	0	2.8	
8	5.1	3.9	6.1	7.4	6.2	5.8	6.7	6.2	2	3.9	0	3.2	
9	4.3	5.1	6	5.9	5.6	7.1	5.5	4.8	5.3	3.1	0	2.8	
10	4.9	5.1	6.1	7.2	5.9	7	5.4	5.2	4.4	5.4	0	3.8	
11	4	4.3	5.8	7.6	6	9.5	6.7	2.9	4.1	3.8	0	3.2	
12	4.3	3.6	4.9	7.1	6	1.3	4.8	1.8	5.2	3.7	0	3.7	
13	3.8	5.2	6.2	7.2	6.2	7.7	10.1	4.4	4.9	4.2	0	1.5	
14	5.4	4.9	5.9	5.2	4.8	4.6	0.2	4.8	5.4	4.9	0	3.5	
15	3.9	4.4	5.2	7	4.3	5	5	2.6	4.1	4.1	0	2	
16	3.9	4.6	9.7	6.8	5.3	8	5	1	3.1	4.7	0	1.5	
17	4.2	5.4	7	0	5.8	2.7	2.7	2.8	3.3	3.3	0	2.1	
18	4.1	3.8	5.9	0	3.8	0.7	0.7	0	8.7	4.1	0	1.7	
19	4.1	3.8	5.1	0	6.2	2.3	2.2	0.4	1.7	1.3	0	1.9	
20	4	4.1	4.8	0	4.7	1.9	3.1	3.5	3.4	4.3	0	1.2	
21	3.9	4.1	5.4	0	4.9	3.2	3.1	1.9	5.3	2.8	0	4.4	
22	3.9	3.9	5.7	7.2	0.1	3.2	10.8	3	4.1	1.8	0	3	
23	4.2	3.9	6	3.5	2.9	3.3	2.5	4.1	4.1	3.8	0	2.4	
24	5.7	5.2	6	7.9	4.1	3.3	5.1	2.8	3.8	5.4	0	2.4	
25	3.7	4.1	6.7	8.3	7.8	3.7	4.1	4	4.4	4.3	0	4.2	
26	4.3	4.4	5.4	6.7	6.5	0.5	4.5	5.1	3.1	4.2	0	2.2	
27	3.7	4.4	6.2	7.1	3.5	3.1	4.8	3.6	2.8	2.2	0	2.8	
28	4	4	7.8	4.7	4.1	3	6.3	5.1	2.8	4.1	0	3	
29	4.4		5.2	7.6	3.9	5.3	3.9	4.8	2.8	4.1	0	1.5	
30	4		5.9	5.6	6.3	3.1	1.1	4.9	3.5	2.5	0	3.5	
31	3.6		6.6		5.8		1.6	4.8		2.9		2.8	
	128.1	121.7	182.3	161.5	163	133.6	130.4	115.6	123.1	109.2	0	90.1	1458.6

Serie de datos de evaporación diaria del año 2005, año del huracán Wilma.

1998. Precipitacion diaria (mm)													
Dia	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
1	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	3	
2	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	0	39	0	0	40	0	
5	0	0	0	0	0	0	9	0	40	16	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	
7	0	0	0	0	0	0	30	0	34	5	0	0	
8	0	0	0	0	0	0	4	0	0	3	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	14	0	38	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	9	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	43	
13	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	11	7	0	0	
15	0	0	0	0	0	0	35	23	0	10	0	0	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	3	0	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	
20	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	
21	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	
22	0	0	0.4	0	0	0	13	0	0	34	0	0	
23	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0	
24	0	0	0	0	0	44	18	0	0	0	2	0	
25	0	0	0	0	0	11	0	0	0	21	0	0	
26	0	0	0	0	0	0	28	0	0	6	0	0	
27	0	0	0	0	0	0	14	0	0	10	0	0	
28	0	0	0	0	0	0	0	11	17	17	0	0	
29	0		0	0	64	6	0	74	0	6	0	0	
30	0		0	0	0	22	0	0	0	3	0	0	
31	0		0		15		58	0		16		0	
	0	0	0.4	0	149	83	267	173	140	179	62	55	1108.4

Serie de datos de precipitación (mm) ara el año 1998, año considerado como sequía

1998. Evaporacion diaria													
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
1	0	4.2	5.2	7.9	4.3	4.7		3.9	4.5	5.1	3.6	3.1	
2	0	3.9	5.2	5.2		4.9	3.5	4.9	5.4	5	0.4	2.3	
3	0	4	4.9	4.9	3.3	6	4.8	4.1	4.3	5.9	2.1	3.4	
4	0	4.4	6.2	4.8	6.3	6.2	5.1		4.3	5		2.7	
5	0	4.7	5.1	5.4	5.9	5.1	6.3	3.2	3.7	2.1	6.4	2.2	
6	0	4.2	4.5	4.6	6.1	6.9	5.1	4.2	5.1	2	5.6	5.2	
7	0	3.9	5.6	5	5.7	5.7	4.8	3.8		2	2	0.9	
8	0	4.3	4.1	5.2	7.6	6.1	2.4	5.2	3.3	2	2.5	2.1	
9	0	3.8	6.2	5.2	6.6	6.2		4.8		0.9	1.2	2.8	
10	0	5.1	6.5	4.8	5.8	5.8	5	2.2	1.9	2.1	1.3	1.1	
11	0	4.2	5.3	5.1	7	6.2	4.8	5.1	3.2	5	3.9	0.6	
12	0	4	6.4	5.7	6.4	5.8	5.9	4.8	4	1.9	3.5	1.8	
13	0	4	4	6	6.8	6	6	1.6	4.1	1.1	0.5	0.5	
14	0	4.1	2.9	6.2	7.7	6	7.4	3.5	3	2.9	4.3	2	
15	0	4.2	3.8	5.1	5.3	6	8.3	7.1	2.1	2.3	2.7	2.9	
16	0	4	4.1	5.5	7	6.2	1.2	5.9	3.9	0.5	4.2	3.6	
17	0	4.4	8.5	5.1	6.1	6.8	3.4	4.1	5.3	7	2.3	2.5	
18	0	4.7	5.6	5.7	6	2.9	3.6	3.5	3.7	3.1	0.4	2.6	
19	0	4	6	6.1	6.1	6.9	4.4	4.6	1.8	4	0.9	1.3	
20	0	5	4.8	6	5.9	5.4	4.7	3.8	4.3	1.1	2.1	2	
21	0	5	2.1	5.7	6.2	5.1	4.5	6.2	4	3	1.3	1.2	
22	0	5.7	2.3	6.3	5.8	5.9	2.8	1.5	3.8	3.9	0.9	3.3	
23	0	5.2	6.1	6	5	3.7	2.5	5.3	5.2	2.2	1.9	1.5	
24	0	5	4.8	5.7	5.7	1.3		3.8	4.2	1.2	2.8	2.9	
25	0	3.9	6.2	6.3	4.9	9.8	2.8	6.3	7.1	1	3.1	3.3	
26	0	4.2	4.3	6	5.9	1.9		6	1.3	1.1	4.5	1.9	
27	0	4.9	6.2	5.1	3	3.3		4.3	5.3	1.6	1.2	2.9	
28	0	3.8	6.1	5.1	1.5	2.9	4.1	3.2	1.9		1.3	3	
29	0		4.8	7		8.1	4.2		3.3	2.5	3.4	2.9	
30	0		5.6	6.7	5.5	8.6	0.8	0.6	4.6	0.9	2.1	3.2	
31	0		5.3					1.8		0.4		3	
	0	122.8	158.7	169.4	159.4	166.4	108.4	119.3	108.6	78.8	72.4	74.7	1338.9

Serie de datos de evaporación diaria para el año 1998. En marzo de 1998, en Campeche sufren más de 6,500 familias la falta total del agua; en abril de 1998, en Campeche, Tabasco y Yucatán, se declara la peor sequía desde hace 20 años, con más de 290 mil hectáreas de pastizales afectadas y 51 mil hectáreas de maíz, frijol y sorgo, además de que se dejaron de producir 630 mil litros de leche y 1,800 toneladas de carne. En junio de ese mismo año, se reportan perdidas más de 5 mil hectáreas de pastizales y maíz, y la muerte semanal de 20 mil aves de corral

Año	hp máxima (mm)
1979	30.5
1980	91.5
1983	71
1984	104
1985	45
1986	76
1987	70.4
1988	73
1989	95
1990	77
1991	95
1992	69
1993	82
1994	119
1995	230
1996	65
1997	90
1998	74
1999	65
2000	70
2001	60
2002	111
2003	74
2004	62
2005	60
2006	70
2007	84
2008	57.8
2009	32.5
2010	42.8
2011	100
2012	70

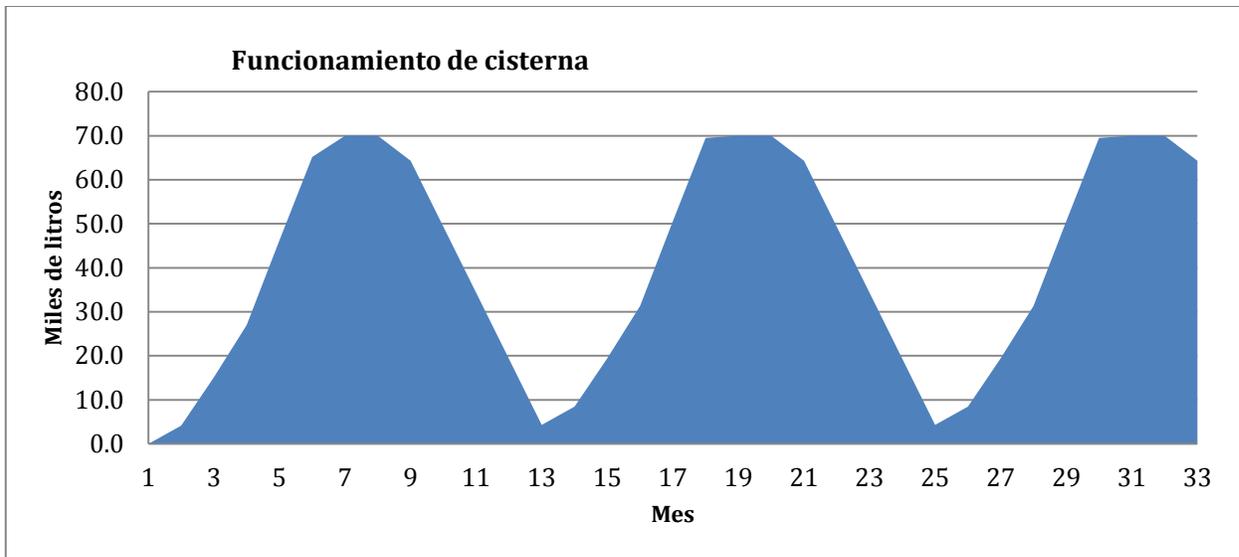
Precipitación máxima diaria por año

Apéndice 2

Funcionamientos de vaso (cisternas, jagüeyes y bordos)

Año	Mes	Consumo mensual por persona		Captación		Pérdidas (5% del volumen de almacenamiento)	Funcionamiento	
		litros	m ³	m ³ /m ²	m ³		m ³	m ³
Año 1	Mayo	3000	3	0.101	4.0	0.2	0.8	0.8
	Junio	3000	3	0.137	5.5	0.3	2.2	3.0
	Julio	3000	3	0.141	5.7	0.3	2.4	5.4
	Agosto	3000	3	0.180	7.2	0.4	3.9	9.3
	Septiembre	3000	3	0.178	7.1	0.4	3.8	13.0
	Octubre	3000	3	0.133	5.3	0.3	2.1	14.0
	Noviembre	3000	3	0.094	3.7	0.2	0.6	14.0
	Diciembre	3000	3	0.049	2.0	0.1	-1.1	12.9
Año 2	Enero	3000	3	0.000	0.0	0.0	-3.0	9.9
	Febrero	3000	3	0.000	0.0	0.0	-3.0	6.9
	Marzo	3000	3	0.000	0.0	0.0	-3.0	3.9
	Abril	3000	3	0.000	0.0	0.0	-3.0	0.9
	Mayo	3000	3	0.101	4.0	0.2	0.8	1.7
	Junio	3000	3	0.137	5.5	0.3	2.2	3.9
	Julio	3000	3	0.141	5.7	0.3	2.4	6.3
	Agosto	3000	3	0.180	7.2	0.4	3.9	10.1
	Septiembre	3000	3	0.178	7.1	0.4	3.8	13.9
	Octubre	3000	3	0.133	5.3	0.3	2.1	14.0
	Noviembre	3000	3	0.094	3.7	0.2	0.6	14.0
	Diciembre	3000	3	0.049	2.0	0.1	-1.1	12.9
Año 3	Enero	3000	3	0.000	0.0	0.0	-3.0	9.9
	Febrero	3000	3	0.000	0.0	0.0	-3.0	6.9
	Marzo	3000	3	0.141	0.0	0.0	-3.0	3.9
	Abril	3000	3	0.000	0.0	0.0	-3.0	0.9
	Mayo	3000	3	0.101	4.0	0.2	0.8	1.7
	Junio	3000	3	0.137	5.5	0.3	2.2	3.9
	Julio	3000	3	0.141	5.7	0.3	2.4	6.3
	Agosto	3000	3	0.180	7.2	0.4	3.9	10.1
	Septiembre	3000	3	0.178	7.1	0.4	3.8	13.9
	Octubre	3000	3	0.133	5.3	0.3	2.1	14.0
	Noviembre	3000	3	0.094	3.7	0.2	0.6	14.0
	Diciembre	3000	3	0.049	2.0	0.1	-1.1	12.9

Funcionamiento de cisterna en un periodo de tres años. Con la precipitación de la zona



Gráfica 2: Variación del volumen de agua en la cisterna a lo largo de tres años.

Bordo		Tierra colorada alto	
Profundidad máxima		3,3	m
Vol. almacenamiento máximo		20,876.00	m ³
Espejo de agua		9,207.00	m ²
Fondo		---	m ²
Área de captación		1,084,752	m ²
	Ac espejo de agua	9,207	m ²
	Ac puslum	1,075,545	m ²
	total	1.0848	km ²
Jagüey		Tierra colorado bajo	
Profundidad máxima		5.00	m
Vol. almacenamiento máximo		75,127.00	m ³
Espejo de agua		23,789.00	m ²
Fondo		---	m ²
Área de captación		1,163,230	m ²
	Ac espejo de agua	23,789	m ²
	Ac acalché	327,184	
	Ac puslum	812,957	m ²
	total	1.163	km ²

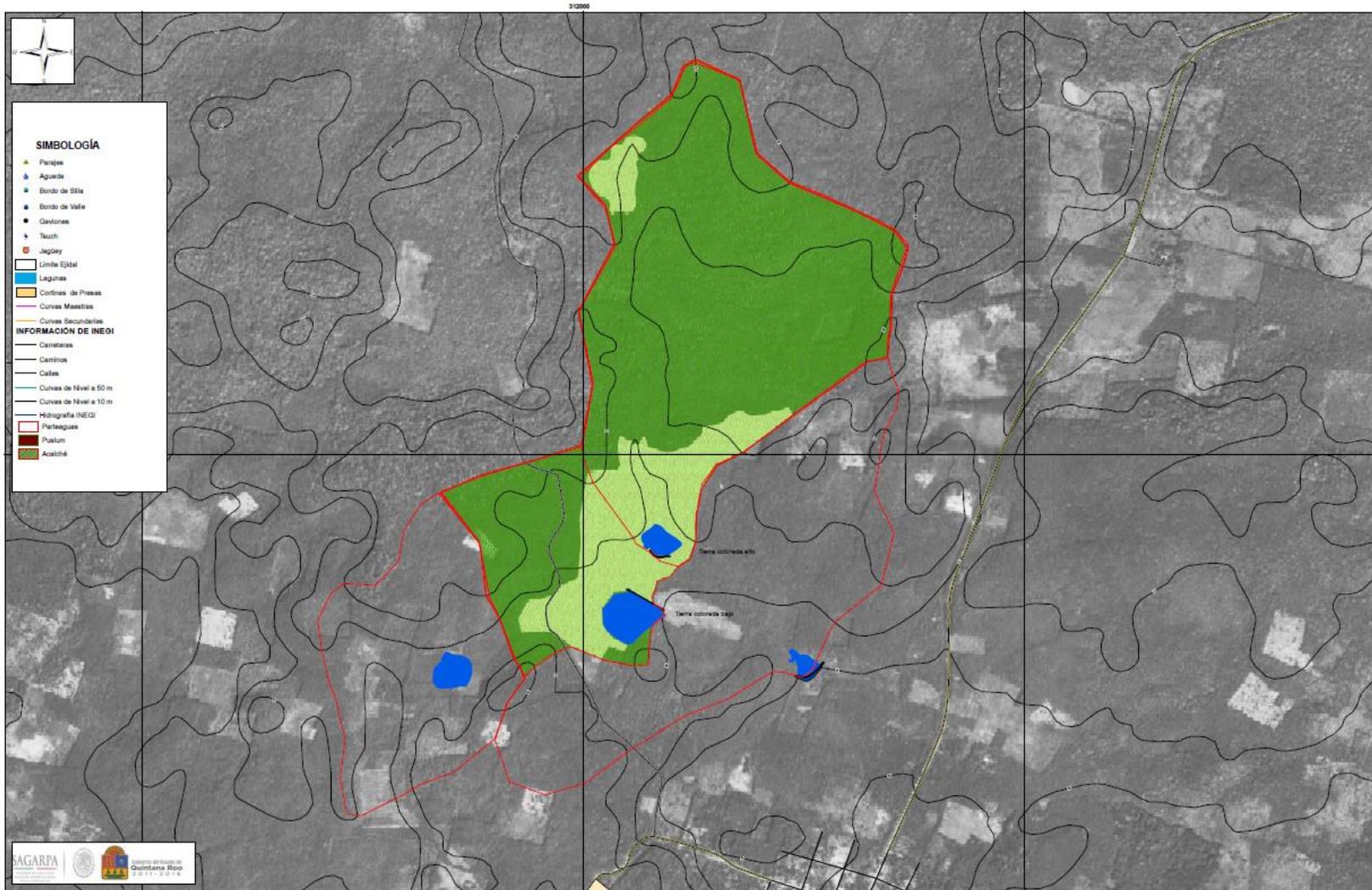
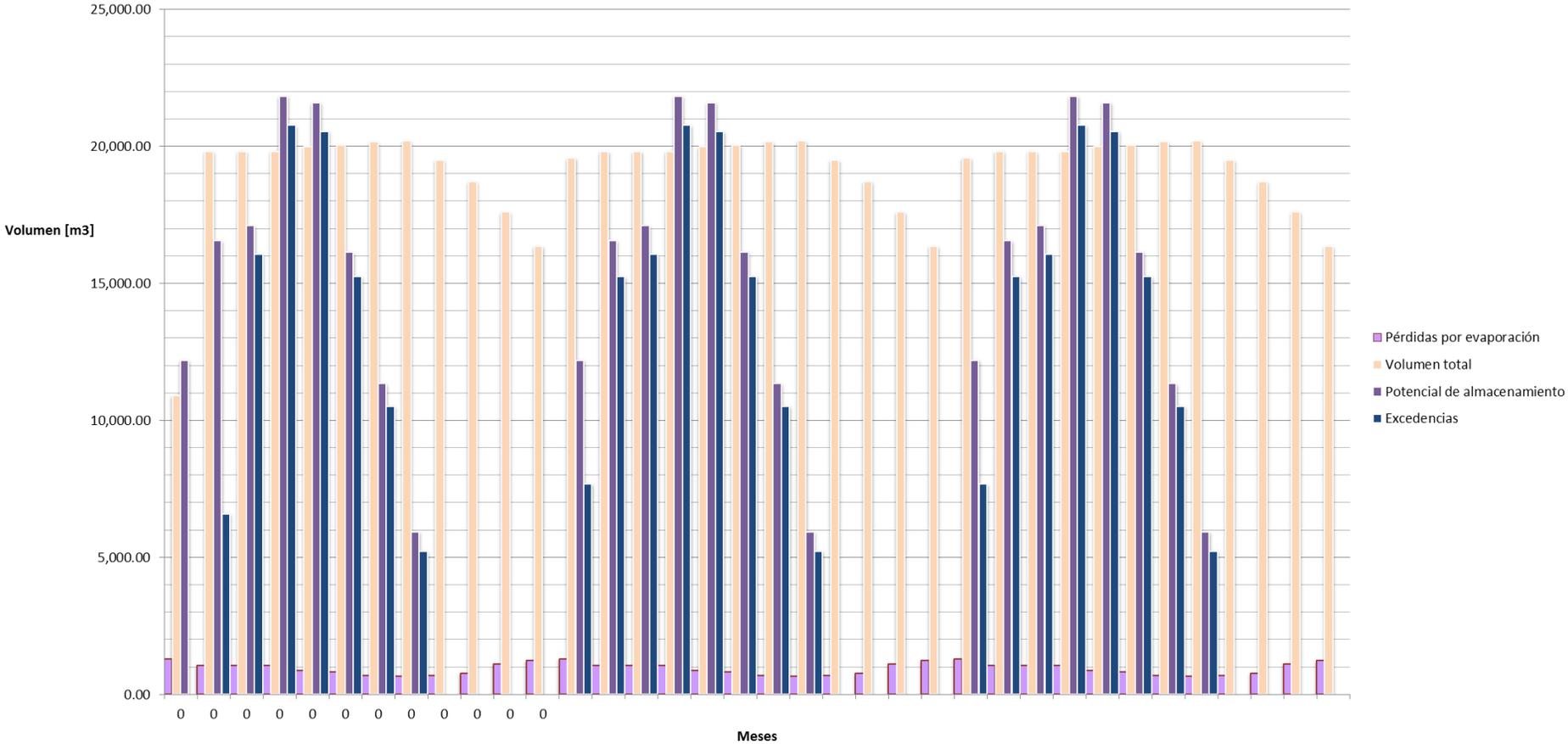
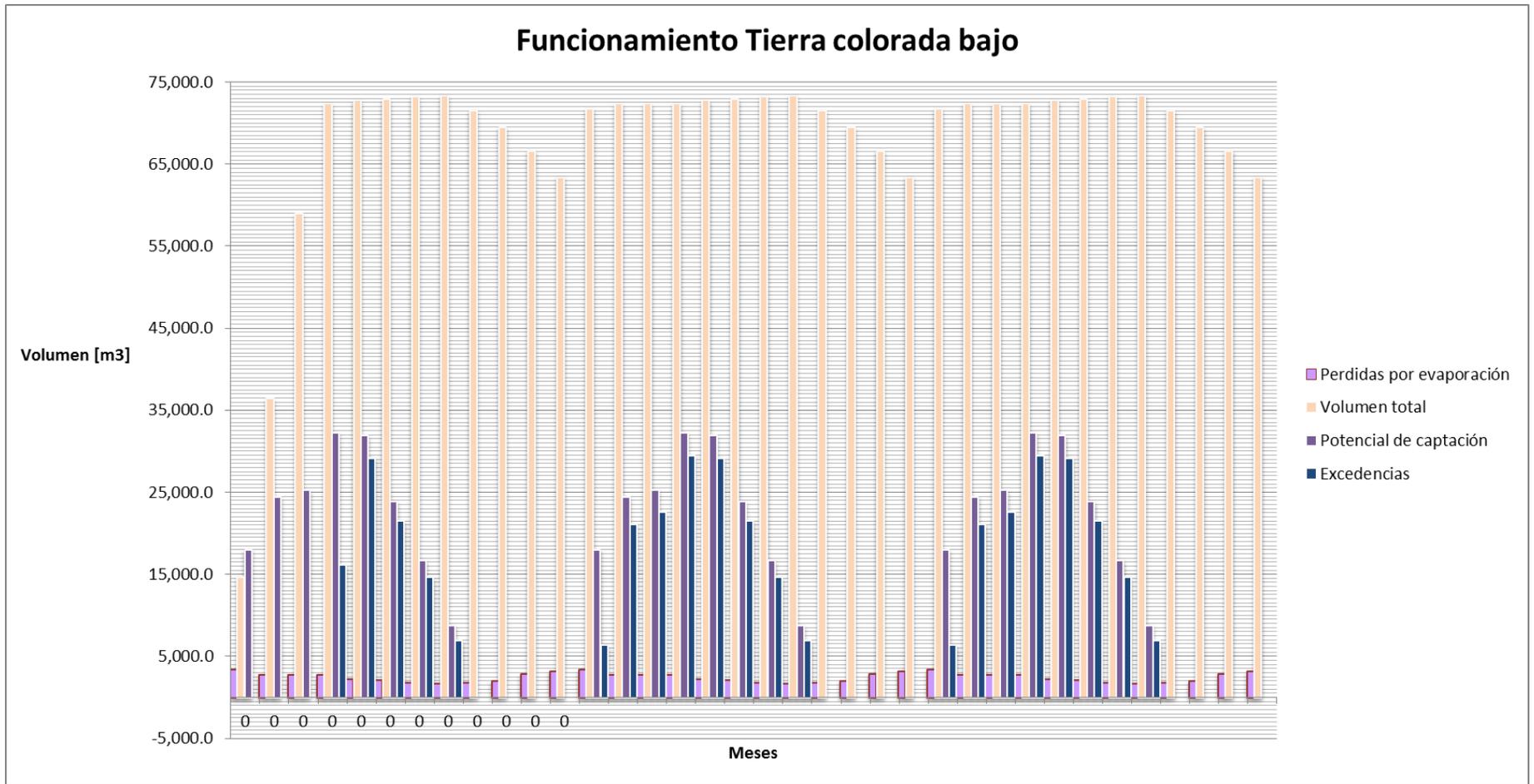


Figura 0-1 Delimitación de microcuencas para cada cuerpo de agua proyectado de un paraje del Naranja. Se nota la caracterización de suelos para las dos presas

Funcionamiento Tierra colorada alto



Mes	Captación, Escurrimiento directo					Potencial de captación	Volumen por llenar o aprovechado	Volumen captado	Volumen captado acumulado	Pérdidas por evaporación	Aprovechamiento	Volumen total	Excedencias	Capacidad
	Akálche	Puslum	Camino	Embalse	Excedencias aguas arriba									
	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]									
Mayo	0.0	11,173.3	0.0	1,031.2	0.0	12,204.5	8,671.5	12,204.5	12,204.5	1,298.9	0.0	10,905.6	0.0	52.2%
Junio	0.0	15,163.8	0.0	1,399.5	0.0	16,563.3	9,970.4	16,563.3	20,876.0	1,059.3	0.0	19,816.7	6,592.9	94.9%
Julio	0.0	15,672.6	0.0	1,446.4	0.0	17,119.0	1,059.3	17,119.0	20,876.0	1,058.6	0.0	19,817.4	16,059.7	94.9%
Agosto	0.0	19,992.3	0.0	1,845.1	0.0	21,837.4	1,058.6	20,876.0	20,876.0	1,055.1	0.0	19,820.9	20,778.8	94.9%
Septiembre	0.0	19,782.8	0.0	1,825.7	0.0	21,608.5	1,055.1	20,876.0	20,876.0	879.0	0.0	19,997.0	20,553.4	95.8%
Octubre	0.0	14,784.7	0.0	1,364.5	1,927.4	16,149.2	879.0	16,149.2	20,876.0	820.3	0.0	20,055.7	15,270.1	96.1%
Noviembre	0.0	10,385.2	0.0	958.4	1,884.1	11,343.7	820.3	11,343.7	20,876.0	706.4	0.0	20,169.6	10,523.3	96.6%
Diciembre	0.0	5,437.0	0.0	501.8	595.5	5,938.8	706.4	5,938.8	20,876.0	674.0	0.0	20,202.0	5,232.4	96.8%
Enero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	674.0	0.0	20,202.0	694.0	0.0	19,508.1	0.0	93.4%
Febrero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1,367.9	0.0	19,508.1	788.6	0.0	18,719.5	0.0	89.7%
Marzo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2,156.5	0.0	18,719.5	1,117.3	0.0	17,602.2	0.0	84.3%
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3,273.8	0.0	17,602.2	1,243.6	0.0	16,358.6	0.0	78.4%
Mayo	0.0	11,173.3	0.0	1,031.2	0.0	12,204.5	4,517.4	12,204.5	20,876.0	1,298.9	0.0	19,577.1	7,687.1	93.8%
Junio	0.0	15,163.8	0.0	1,399.5	0.0	16,563.3	1,298.9	16,563.3	20,876.0	1,059.3	0.0	19,816.7	15,264.4	94.9%
Julio	0.0	15,672.6	0.0	1,446.4	2,600.5	17,119.0	1,059.3	17,119.0	20,876.0	1,058.6	0.0	19,817.4	16,059.7	94.9%
Agosto	0.0	19,992.3	0.0	1,845.1	4,362.0	21,837.4	1,058.6	20,876.0	20,876.0	1,055.1	0.0	19,820.9	20,778.8	94.9%
Septiembre	0.0	19,782.8	0.0	1,825.7	4,305.5	21,608.5	1,055.1	20,876.0	20,876.0	879.0	0.0	19,997.0	20,553.4	95.8%
Octubre	0.0	14,784.7	0.0	1,364.5	3,090.0	16,149.2	879.0	16,149.2	20,876.0	820.3	0.0	20,055.7	15,270.1	96.1%
Noviembre	0.0	10,385.2	0.0	958.4	1,884.1	11,343.7	820.3	11,343.7	20,876.0	706.4	0.0	20,169.6	10,523.3	96.6%
Diciembre	0.0	5,437.0	0.0	501.8	595.5	5,938.8	706.4	5,938.8	20,876.0	674.0	0.0	20,202.0	5,232.4	96.8%
Enero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	674.0	0.0	20,202.0	694.0	0.0	19,508.1	0.0	93.4%
Febrero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1,367.9	0.0	19,508.1	788.6	0.0	18,719.5	0.0	89.7%
Marzo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2,156.5	0.0	18,719.5	1,117.3	0.0	17,602.2	0.0	84.3%
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3,273.8	0.0	17,602.2	1,243.6	0.0	16,358.6	0.0	78.4%
Mayo	0.0	11,173.3	0.0	1,031.2	0.0	12,204.5	4,517.4	12,204.5	20,876.0	1,298.9	0.0	19,577.1	7,687.1	93.8%
Junio	0.0	15,163.8	0.0	1,399.5	0.0	16,563.3	1,298.9	16,563.3	20,876.0	1,059.3	0.0	19,816.7	15,264.4	94.9%
Julio	0.0	15,672.6	0.0	1,446.4	2,600.5	17,119.0	1,059.3	17,119.0	20,876.0	1,058.6	0.0	19,817.4	16,059.7	94.9%
Agosto	0.0	19,992.3	0.0	1,845.1	4,362.0	21,837.4	1,058.6	20,876.0	20,876.0	1,055.1	0.0	19,820.9	20,778.8	94.9%
Septiembre	0.0	19,782.8	0.0	1,825.7	4,305.5	21,608.5	1,055.1	20,876.0	20,876.0	879.0	0.0	19,997.0	20,553.4	95.8%
Octubre	0.0	14,784.7	0.0	1,364.5	3,090.0	16,149.2	879.0	16,149.2	20,876.0	820.3	0.0	20,055.7	15,270.1	96.1%
Noviembre	0.0	10,385.2	0.0	958.4	1,884.1	11,343.7	820.3	11,343.7	20,876.0	706.4	0.0	20,169.6	10,523.3	96.6%
Diciembre	0.0	5,437.0	0.0	501.8	595.5	5,938.8	706.4	5,938.8	20,876.0	674.0	0.0	20,202.0	5,232.4	96.8%
Enero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	674.0	0.0	20,202.0	694.0	0.0	19,508.1	0.0	93.4%
Febrero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1,367.9	0.0	19,508.1	788.6	0.0	18,719.5	0.0	89.7%
Marzo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2,156.5	0.0	18,719.5	1,117.3	0.0	17,602.2	0.0	84.3%
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3,273.8	0.0	17,602.2	1,243.6	0.0	16,358.6	0.0	78.4%
														91.3%



Gráfica del funcionamiento de vaso de un bordo. Se observa como el potencial de captación mensual es mayor que la capacidad de almacenamiento, por lo que a los primeros meses de lluvia el bordo estará vertiendo

Mes	Captación, Escurrimiento directo					Potencial de captación	Volumen por llenar o aprovechado	Volumen captado	Volumen captado acumulado	Pérdidas por evaporación	Aprovechamiento	Volumen total	Excedencias	Capacidad
	Akálche	Puslum	Camino	Embalse	Excedencias aguas arriba									
	[m ³]	[m ³]	[m ³]	[m ³]	[m ³]									
					TCA									
						[m ³]	[m ³]	[m ³]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /mes]	[m ³]	[m ³]	[%]
Mayo	6,930.7	8,445.4	0.0	2,664.4	0.0	18,040.5	57,086.5	18,040.5	18,040.5	3,356.0	0.0	14,684.4	0.0	19.5%
Junio	9,405.9	11,461.6	0.0	3,615.9	0.0	24,483.5	60,442.6	24,483.5	39,167.9	2,736.9	0.0	36,431.0	0.0	48.5%
Julio	9,721.5	11,846.2	0.0	3,737.3	0.0	25,305.0	38,696.0	25,305.0	61,735.9	2,735.1	0.0	59,000.8	0.0	78.5%
Agosto	12,400.9	15,111.3	0.0	4,767.3	0.0	32,279.5	16,126.2	32,279.5	75,127.0	2,726.2	0.0	72,400.8	16,153.3	96.4%
Septiembre	12,271.0	14,952.9	0.0	4,717.4	0.0	31,941.3	2,726.2	31,941.3	75,127.0	2,271.3	0.0	72,855.7	29,215.1	97.0%
Octubre	9,170.8	11,175.1	0.0	3,525.5	0.0	23,871.4	2,271.3	23,871.4	75,127.0	2,119.6	0.0	73,007.4	21,600.1	97.2%
Noviembre	6,441.8	7,849.7	0.0	2,476.4	0.0	16,768.0	2,119.6	16,768.0	75,127.0	1,825.2	0.0	73,301.8	14,648.4	97.6%
Diciembre	3,372.5	4,109.6	0.0	1,296.5	0.0	8,778.6	1,825.2	8,778.6	75,127.0	1,741.4	0.0	73,385.6	6,953.4	97.7%
Enero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1,741.4	0.0	73,385.6	1,793.1	0.0	71,592.5	0.0	95.3%
Febrero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3,534.5	0.0	71,592.5	2,037.5	0.0	69,555.0	0.0	92.6%
Marzo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5,572.0	0.0	69,555.0	2,886.8	0.0	66,668.2	0.0	88.7%
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8,458.8	0.0	66,668.2	3,213.3	0.0	63,454.9	0.0	84.5%
Mayo	6,930.7	8,445.4	0.0	2,664.4	0.0	18,040.5	11,672.1	18,040.5	75,127.0	3,356.0	0.0	71,771.0	6,368.4	95.5%
Junio	9,405.9	11,461.6	0.0	3,615.9	0.0	24,483.5	3,356.0	24,483.5	75,127.0	2,736.9	0.0	72,390.1	21,127.4	96.4%
Julio	9,721.5	11,846.2	0.0	3,737.3	0.0	25,305.0	2,736.9	25,305.0	75,127.0	2,735.1	0.0	72,391.9	22,568.0	96.4%
Agosto	12,400.9	15,111.3	0.0	4,767.3	0.0	32,279.5	2,735.1	32,279.5	75,127.0	2,726.2	0.0	72,400.8	29,544.4	96.4%
Septiembre	12,271.0	14,952.9	0.0	4,717.4	0.0	31,941.3	2,726.2	31,941.3	75,127.0	2,271.3	0.0	72,855.7	29,215.1	97.0%
Octubre	9,170.8	11,175.1	0.0	3,525.5	0.0	23,871.4	2,271.3	23,871.4	75,127.0	2,119.6	0.0	73,007.4	21,600.1	97.2%
Noviembre	6,441.8	7,849.7	0.0	2,476.4	0.0	16,768.0	2,119.6	16,768.0	75,127.0	1,825.2	0.0	73,301.8	14,648.4	97.6%
Diciembre	3,372.5	4,109.6	0.0	1,296.5	0.0	8,778.6	1,825.2	8,778.6	75,127.0	1,741.4	0.0	73,385.6	6,953.4	97.7%
Enero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1,741.4	0.0	73,385.6	1,793.1	0.0	71,592.5	0.0	95.3%
Febrero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3,534.5	0.0	71,592.5	2,037.5	0.0	69,555.0	0.0	92.6%
Marzo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5,572.0	0.0	69,555.0	2,886.8	0.0	66,668.2	0.0	88.7%
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8,458.8	0.0	66,668.2	3,213.3	0.0	63,454.9	0.0	84.5%
Mayo	6,930.7	8,445.4	0.0	2,664.4	0.0	18,040.5	11,672.1	18,040.5	75,127.0	3,356.0	0.0	71,771.0	6,368.4	95.5%
Junio	9,405.9	11,461.6	0.0	3,615.9	0.0	24,483.5	3,356.0	24,483.5	75,127.0	2,736.9	0.0	72,390.1	21,127.4	96.4%
Julio	9,721.5	11,846.2	0.0	3,737.3	0.0	25,305.0	2,736.9	25,305.0	75,127.0	2,735.1	0.0	72,391.9	22,568.0	96.4%
Agosto	12,400.9	15,111.3	0.0	4,767.3	0.0	32,279.5	2,735.1	32,279.5	75,127.0	2,726.2	0.0	72,400.8	29,544.4	96.4%
Septiembre	12,271.0	14,952.9	0.0	4,717.4	0.0	31,941.3	2,726.2	31,941.3	75,127.0	2,271.3	0.0	72,855.7	29,215.1	97.0%
Octubre	9,170.8	11,175.1	0.0	3,525.5	0.0	23,871.4	2,271.3	23,871.4	75,127.0	2,119.6	0.0	73,007.4	21,600.1	97.2%
Noviembre	6,441.8	7,849.7	0.0	2,476.4	0.0	16,768.0	2,119.6	16,768.0	75,127.0	1,825.2	0.0	73,301.8	14,648.4	97.6%
Diciembre	3,372.5	4,109.6	0.0	1,296.5	0.0	8,778.6	1,825.2	8,778.6	75,127.0	1,741.4	0.0	73,385.6	6,953.4	97.7%
Enero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1,741.4	0.0	73,385.6	1,793.1	0.0	71,592.5	0.0	95.3%
Febrero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3,534.5	0.0	71,592.5	2,037.5	0.0	69,555.0	0.0	92.6%
Marzo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5,572.0	0.0	69,555.0	2,886.8	0.0	66,668.2	0.0	88.7%
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8,458.8	0.0	66,668.2	3,213.3	0.0	63,454.9	0.0	84.5%
														90.7%



Obras y cuencas en el ejido El Naranjal. Se ubican los cuerpos de agua y obras en la cuenca. Se dibuja sobre las ortofotos de la región y el modelo digital de elevación.

Apéndice 3

Precipitación efectiva. Número “N”

			01-ene-99	02-ene-99	03-ene-99	04-ene-99	05-ene-99	06-ene-99	07-ene-99	08-ene-99	09-ene-99	10-ene-99	11-ene-99	12-ene-99	13-ene-99	14-ene-99	01-jun-99	02-jun-99	03-jun-99							
precipitación	hp		0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0						
Corrección de N	L ₅	-		0.6	-	-	0.6	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0						
Número de curva corregido	Nc	-		31.0	-	-	31.0	31.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0						
Restricción		-		19.6	-	-	19.6	19.6	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3						
precipitación efectiva	pe		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.57						
Escorrentía directa	Q=pe*Ac		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	105.7						
Escorrentía directa (con restricción)	Q=pe*Ac		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
04-jun-99	05-jun-99	06-jun-99	07-jun-99	08-jun-99	09-jun-99	10-jun-99	11-jun-99	12-jun-99	13-jun-99	14-jun-99	15-jun-99	16-jun-99	17-jun-99	18-jun-99	19-jun-99	20-jun-99	21-jun-99	22-jun-99	23-jun-99	24-jun-99						
4.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	5.0	0.0	4.0	4.0	2.0	40.0	3.0	5.0						
1.0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.0	1.4	1.4						
50.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	50.0	70.0	70.0						
11.3	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	11.3	7.8	7.8						
10.57	0.00	20.58	0.00	0.00	0.00	2.25	0.00	0.00	0.00	0.00	11.08	0.00	25.54	0.00	26.07	26.07	27.16	0.48	3.91	3.05						
105.7	0.0	205.8	0.0	0.0	0.0	22.5	0.0	0.0	0.0	0.0	110.8	0.0	255.4	0.0	260.7	260.7	271.6	4.8	39.1	30.5						
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8	0.0	0.0						
25-jun-99	26-jun-99	27-jun-99	28-jun-99	29-jun-99	30-jun-99	01-jul-99	02-jul-99	03-jul-99	04-jul-99	05-jul-99	06-jul-99	07-jul-99	08-jul-99	09-jul-99	10-jul-99	11-jul-99	12-jul-99	13-jul-99	14-jul-99	15-jul-99	16-jul-99	17-jul-99	18-jul-99	19-jul-99		
0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	0.0	4.0	10.0	7.0	0.0	3.0	2.0	50.0	5.0	2.0	0.0	16.0		
1.0	1.0	0.6	0.6	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	0.6	0.6	1.0	1.0	0.6	0.6	1.0	1.0	0.6	0.6	0.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4		
50.0	50.0	31.0	31.0	50.0	31.0	50.0	50.0	50.0	31.0	31.0	50.0	50.0	31.0	31.0	50.0	50.0	31.0	31.0	31.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0		
11.3	11.3	19.6	19.6	11.3	19.6	11.3	11.3	11.3	19.6	19.6	11.3	11.3	19.6	19.6	11.3	11.3	19.6	19.6	19.6	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8		
0.00	0.00	0.00	0.00	7.40	0.00	5.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.86	0.00	26.07	7.81	9.13	0.00	26.61	27.16	5.81	3.05	4.39	0.00	0.32		
0.0	0.0	0.0	0.0	74.0	0.0	51.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.6	0.0	260.7	78.1	91.3	0.0	266.1	271.6	58.1	30.5	43.9	0.0	3.2		
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	51.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58.1	0.0	0.0	0.0	3.2		
20-jul-99	21-jul-99	22-jul-99	23-jul-99	24-jul-99	25-jul-99	26-jul-99	27-jul-99	28-jul-99	29-jul-99	30-jul-99	31-jul-99	01-ago-99	02-ago-99	03-ago-99	04-ago-99	05-ago-99	06-ago-99	07-ago-99	08-ago-99	09-ago-99	10-ago-99	11-ago-99	12-ago-99	13-ago-99	14-ago-99	15-ago-99
0.0	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	16.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
0.6	0.6	1.0	1.0	0.6	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.0	1.0	
31.0	31.0	50.0	50.0	31.0	31.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	31.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	70.0	70.0	70.0	70.0	50.0	50.0	
19.6	19.6	11.3	11.3	19.6	19.6	11.3	11.3	11.3	11.3	19.6	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	7.8	7.8	7.8	7.8	11.3	11.3	
0.00	0.00	5.52	0.00	0.00	0.00	5.52	8.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.00	2.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.0	0.0	55.2	0.0	0.0	0.0	55.2	82.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.0	26.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
0.0	0.0	55.2	0.0	0.0	0.0	55.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.0	26.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
16-ago-99	17-ago-99	18-ago-99	19-ago-99	20-ago-99	21-ago-99	22-ago-99	23-ago-99	24-ago-99	25-ago-99	26-ago-99	27-ago-99	28-ago-99	29-ago-99	30-ago-99	31-ago-99	01-sep-99	02-sep-99	03-sep-99	04-sep-99	05-sep-99	06-sep-99	07-sep-99	08-sep-99	09-sep-99	10-sep-99	
18.0	10.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	0.6	0.6	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	
50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	31.0	50.0	50.0	31.0	31.0	31.0	31.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	31.0	31.0	
11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	19.6	11.3	11.3	11.3	19.6	19.6	19.6	19.6	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	19.6	
4.86	7.81	3.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.15	0.00	0.00	
48.6	78.1	36.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	105.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	121.5	0.0	0.0	
48.6	0.0	36.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Resumen de información de escurrimiento directo en un año para una hectárea.

Método del número N			
	hp	hpe	Qe
	mm	mm	m ³ /s
Enero	66.9	0.96	10
Febrero	24.8	2.96	30
Marzo	59.3	0.28	3
Abril	48.5	0.02	0
Mayo	112	11.88	119
Junio	152	28.83	288
Julio	157.1	31.36	314
Agosto	200.4	55.45	555
Septiembre	198.3	54.19	542
Octubre	148.2	27.00	270
Noviembre	104.1	9.24	92
Diciembre	54.5	0.05	1
		222.23	2,222

Método de los número de escurrimiento
Lluvia efectiva

Bajo Área= 10000 m

Atillos Área= 20000 m

Tipo cuenca Ak'alche y Pus'lum

Alttillos	N1=	15	
Bajos	N2=	61	
	Nprom		46

Tipo D Ak'alche Infiltración mínima

0-1.27 mm/h

Barbecho/parcela	N1=	90
Bajos	N2=	61
	Nprom	71

Tipo A Pus'lum Infiltración mínima

7.62 -11.43 mm/h

Barbecho/parcela	N1=	74
Monte alto	N2=	15
	Nprom	35

Apéndice 4

Simulación de cultivos (método de Flinn)

Características del suelo y el cultivo

Tipo de cultivo	Maíz
Profundidad radicular Hr (m)	1.20
Selecciona Tipo de Suelo	A
Selecciona N Escurrimiento	50

	Kc				
mes	1	2	3	4	5
	0.58	0.92	1.08	1	0.86

Mecanizado del Naranjal		
Ejemplo de una parcela en zona de ak'alche en conservación y una cobertura buena		
N=	Tipo D	hr (m)
83		1.2
Factor de corrección Tipo A		0.62
Factor de corrección Tipo B		1.40
Cultivo		Maíz
Periodo vegetativo		150

Política de Riego POL (%)	24	APROX CUANDO BAJE DE 94 LA POLITICA DE LA HUMEDAD	
Humedad Aprovechable HA (%)	60		
Producción Total	Y=	10.0	ton/ha
Capacidad de Campo	CC=	42.0	%
PMP	PMP=	25.0	%
Peso Especifico del suelo	γ_s =	1.30	gr/cm ²
Peso Especifico del agua	γ_s =	1.0	gr/cm ²

Lamina total de riego	Σr =	127.18	mm
Lamina no aprovechable de lluvia	ΣQ =	262.00	mm
Lamina de lluvia total	Σhp =	576.00	mm
Lamina de lluvia aprovechada (infiltración)	ΣY =	465.94	mm

Dosis

d= 0.0636
 d= 63.6 m
 mm

Humedad Aprovechable 0.265 m
 265.0 mm

HUMEDAD PARA APLICAR RIEGO 201.4 m

	j/kg	bars	W %
PMP	1500.0	15	25.01
CC	33.33	0.3	42.00

PRODUCCIONES

Desarrollo Germinación	14.61
Desarrollo Crecimiento	57.01
Desarrollo Floración	38.81
Desarrollo Madurez	28.05

Producción Final 9.05 Ton/Ha

Ai ha	60
Ai m2	600000
V riego m3	76,306

Agosto																													
95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124
0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	40	0	0	0	0	0	18	10	22	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	
1.0	0.6	-	-	-	-	-	-	-	0.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.0	-	-	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	-	-	0.6	0.6	0.6	0.6
83.0	51.5	-	-	-	-	-	-	-	51.5	116.2	116.2	116.2	116.2	83.0	-	-	51.5	83.0	83.0	83.0	83.0	83.0	51.5	-	-	51.5	51.5	51.5	51.5
52.0	52.0	-	-	-	-	-	-	-	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	-	-	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	-	-	52.0	52.0	52.0	52.0
2.6	2.6	0	0	0	0	0	0	0	0.0	10.7	2.6	2.6	2.6	2.6	0	0	1.0	0.0	2.1	2.6	2.6	2.6	2.6	0	0	0.9	2.6	2.6	2.6
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	29.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	10.0	19.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0
5.83	4.49	4.65	5.02	4.68	4.55	5.36	4.66	5.29	9.84	2.42	1.71	3.94	5.83	3.34	1.66	3.91	3.63	3.87	2.2	1.84	5.2	5.33	2.35	1.24	4.41	3.5	4.29	3.98	3.43
1.08	1.07	1.07	1.07	1.07	1.06	1.06	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05	1.05	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00
6.3	4.8	5.0	5.4	5.0	4.8	5.7	4.9	5.6	10.4	2.5	1.8	4.1	6.1	3.5	1.7	4.0	3.7	4.0	2.3	1.9	5.3	5.4	2.4	1.3	4.5	3.5	4.3	4.0	3.4
253.6	248.8	244.1	239.4	234.5	229.8	225.4	220.8	216.4	212.1	224.1	250.8	249.1	245.0	240.2	236.7	235.0	231.1	244.5	250.6	262.7	260.8	255.7	250.5	248.1	246.9	242.5	242.2	238.0	234.1
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
253.6	248.8	244.1	239.4	234.5	229.8	225.4	220.8	216.4	224.1	253.4	250.8	249.1	245.0	240.2	236.7	235.0	248.1	254.5	265.0	262.7	260.8	255.7	250.5	248.1	246.9	242.5	242.2	238.0	234.1
41.3	41.0	40.7	40.4	40.0	39.7	39.5	39.2	38.9	38.6	39.4	41.1	41.0	40.7	40.4	40.2	40.1	39.8	40.7	41.1	41.9	41.7	41.4	41.1	40.9	40.8	40.6	40.5	40.3	40.0
45.4	51.0	56.6	62.5	68.9	75.2	81.6	88.2	95.0	101.9	83.4	48.6	50.7	55.5	61.5	65.9	68.1	73.4	56.1	48.9	35.6	37.6	43.2	49.0	51.8	53.3	58.5	59.0	64.3	69.4
4.9	4.7	4.7	4.9	4.6	4.5	4.5	4.4	4.3	FALSO	2.5	1.8	4.0	4.8	3.4	1.7	3.9	3.6	3.9	2.3	1.9	5.1	5.2	2.4	1.3	4.3	3.5	4.2	3.9	3.4
248.8	244.1	239.4	234.5	229.8	225.4	220.8	216.4	212.1	224.1	250.8	249.1	245.0	240.2	236.7	235.0	231.1	244.5	250.6	262.7	260.8	255.7	250.5	248.1	246.9	242.5	242.2	238.0	234.1	230.7
0.8	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.0	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.5	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.6	0.8	0.5	0.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0

Julio																													
65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94
0	17	0	0	0	0	0	18	0	4	10	7	0	3	2	50	5	2	0	16	0	0	16	0	0	0	16	9	0	0
0.6	1.0	1.0	1.0	0.6	0.6	-	0.6	0.6	0.6	1.0	1.0	0.6	0.6	0.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	0.6	0.6	1.0	1.0	0.6	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0
51.5	83.0	83.0	83.0	51.5	51.5	-	51.5	51.5	51.5	83.0	83.0	51.5	51.5	51.5	116.2	116.2	116.2	116.2	116.2	51.5	51.5	83.0	83.0	51.5	51.5	83.0	83.0	83.0	83.0
52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	-	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
2.6	0.7	2.6	2.6	2.6	2.6	0	1.0	2.6	0.9	0.0	0.2	2.6	1.2	1.6	17.1	0.6	1.6	2.6	0.5	2.6	2.6	0.5	2.6	2.6	0.5	0.0	2.6	2.6	
0.0	16.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0	3.1	10.0	6.8	0.0	1.8	0.4	32.9	4.4	0.4	0.0	15.5	0.0	0.0	15.5	0.0	0.0	0.0	15.5	9.0	0.0	0.0
4.07	1.15	2.26	2.58	4.94	5.84	3.98	6.42	2.72	1.71	3.01	3.8	6.46	2.59	3.61	2	1.44	4.77	1.02	5.23	3.65	5.09	5.23	4.12	4.29	1.16	7.64	2.43	3.77	5.94
0.93	0.93	0.94	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.07	1.07	1.08
3.8	1.1	2.1	2.4	4.7	5.6	3.8	6.2	2.6	1.7	2.9	3.7	6.4	2.6	3.6	2.0	1.5	4.8	1.0	5.4	3.8	5.3	5.5	4.3	4.5	1.2	8.1	2.6	4.1	6.4
250.2	246.5	261.6	259.5	257.1	252.5	247.3	243.6	256.0	253.4	254.8	261.9	261.2	256.3	255.5	252.3	262.9	263.5	259.1	258.1	259.8	256.1	251.0	259.8	255.6	251.1	249.9	265.0	262.4	258.3
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
250.2	262.7	261.6	259.5	257.1	252.5	247.3	260.6	256.0	256.5	264.8	265.0	261.2	258.0	255.8	265.0	265.0	263.9	259.1	265.0	259.8	256.1	265.0	259.8	255.6	251.1	265.0	265.0	262.4	258.3
41.1	40.8	41.8	41.6	41.5	41.2	40.9	40.6	41.4	41.3	41.3	41.8	41.8	41.4	41.4	41.2	41.9	41.9	41.6	41.6	41.7	41.4	41.1	41.7	41.4	41.1	41.0	42.0	41.8	41.6
49.4	53.7	36.7	39.0	41.6	46.7	52.7	57.2	42.8	45.7	44.1	36.5	37.2	42.5	43.4	47.0	35.4	34.8	39.4	40.5	38.7	42.7	48.4	38.7	43.3	48.3	49.7	33.3	36.0	40.2
3.7	1.1	2.1	2.4	4.6	5.2	3.8	4.6	2.6	1.7	2.9	3.7	5.0	2.6	3.6	2.0	1.5	4.8	1.0	5.2	3.7	5.1	5.1	4.3	4.4	1.2	FALSO	2.6	4.0	4.7
246.5	261.6	259.5	257.1	252.5	247.3	243.6	256.0	253.4	254.8	261.9	261.2	256.3	255.5	252.3	262.9	263.5	259.1	258.1	259.8	256.1	251.0	259.8	255.6	251.1	249.9	265.0	262.4	258.3	253.6
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.7
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.5

septembre																														
125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	65	0	4	0	0	12	3	0	5	0	5	32	
0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-	-	-	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.0	
51.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	-	-	-	116.2	116.2	116.2	116.2	116.2	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	83.0	
52.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	-	-	-	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	
2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.1	2.6	2.6	2.6	2.6	0	0	0	28.0	2.6	0.9	2.6	2.6	0.0	1.2	2.6	0.6	2.6	0.6	6.3	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.0	0.0	3.1	0.0	0.0	12.0	1.8	0.0	4.4	0.0	4.4	25.7	
5.8	3.85	4.85	5.52	4.78	4.14	2.87	3.32	4.04	4.17	4.81	3.3	4.35	3	3.3	4.33	3.63	2.88	1.2	1.88	1.72	3.28	4.51	3.77	0.57	2.62	1.42	3.32	1.88	2	
1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89	0.89	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86	0.86
5.8	3.8	4.8	5.4	4.7	4.0	2.8	3.2	3.9	4.0	4.6	3.1	4.1	2.8	3.1	4.0	3.3	2.6	1.1	1.7	1.6	2.9	4.0	3.3	0.5	2.3	1.2	2.9	1.6	1.7	
230.7	226.1	222.4	218.0	213.6	209.4	205.7	203.0	199.9	260.0	256.0	251.5	248.5	244.4	241.7	238.6	234.7	231.4	228.8	263.9	262.2	263.4	260.5	256.5	261.6	262.9	260.6	263.7	260.8	263.3	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	63.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
230.7	226.1	222.4	218.0	213.6	209.4	205.7	203.0	263.5	260.0	256.0	251.5	248.5	244.4	241.7	238.6	234.7	231.4	265.0	263.9	265.0	263.4	260.5	265.0	263.4	262.9	265.0	263.7	265.0	265.0	
39.8	39.5	39.3	39.0	38.7	38.4	38.2	38.0	37.8	41.7	41.4	41.1	40.9	40.7	40.5	40.3	40.1	39.8	39.7	41.9	41.8	41.9	41.7	41.5	41.8	41.9	41.7	41.9	41.7	41.9	
74.0	80.5	85.9	92.5	99.5	106.4	112.8	117.6	123.1	38.5	42.8	47.8	51.4	56.2	59.6	63.5	68.6	73.0	76.6	34.4	36.2	34.9	38.0	42.3	36.8	35.4	37.8	34.6	37.6	35.0	
4.6	3.7	4.4	4.4	4.2	3.7	2.7	3.1	3.6	3.9	4.5	3.1	4.0	2.8	3.0	3.9	3.3	2.6	1.1	1.7	1.6	2.9	4.0	3.3	0.5	2.3	1.2	2.9	1.6	1.7	
226.1	222.4	218.0	213.6	209.4	205.7	203.0	199.9	260.0	256.0	251.5	248.5	244.4	241.7	238.6	234.7	231.4	228.8	263.9	262.2	263.4	260.5	256.5	261.6	262.9	260.6	263.7	260.8	263.3	263.2	
0.8	1.0	0.9	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
0.6	0.9	0.8	0.6	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	