



**“UTILIZACIÓN EFICIENTE DEL AGUA DE LLUVIA
MEDIANTE EL DISEÑO Y TRAZO HIDROLÓGICO DE
TERRENOS EN ÁREAS DE PRECIPITACIÓN LIMITADA”
PROYECTO INTERNO RD-1313.1
Informe final**

COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE
SUBCOORDINACIÓN DE CONSERVACIÓN DE CUENCAS Y
TECNOLOGÍA FORESTAL

Autores: M. C. Héctor G. Cortés Torres
Dr. J. Javier Ramírez Luna
M.I. K. Werner Wruck Spillecke
M. Sc. Marcia A. Yañez Kernke
M. P. D. Alfredo Gómez Garzón

CONTENIDO

	Pág.
1. RESUMEN EJECUTIVO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
3. ANTECEDENTES	2
4. METODOLOGÍA	3
5. RESULTADOS	4
5.1. Revisión de literatura sobre el Diseño Hidrológico del Terreno	4
5.1.1. Los principios del sistema y su base topográfica.	5
5.1.2. Los beneficios al suelo con el manejo hidrológico del terreno en Línea Clave.	9
5.1.3. El eje fundamental del sistema: la absorción de agua por el suelo	10
5.1.4. Aumento de fertilidad por absorción de agua y año de conversión.	11
5.2. Localización y gestión del predio de trabajo	12
5.3. Levantamiento topográfico de los sitios seleccionados	15
5.4. Diseño del sistema en gabinete y en el terreno	19
5.5. Establecimiento del sistema en el terreno	25
5.6. Evaluación de variables hidrológicas en el terreno	28
6. INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA MEDICIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS	38
6.1. Caudalímetro Ultrasónico	38
6.1.1. Funciones de la obra	41
6.1.1.1. Medición de caudales	41
6.1.1.2. Regulación de caudales	42
6.1.1.3. Pérdida de carga necesaria para régimen modular	42
6.1.2. Sensibilidad de la obra de medición	44
6.1.3. La medida de la altura de carga	45
6.1.4. Leyes Carg – Gasto	46
6.1.5. Cálculo del gasto a partir de la medición de nivel	47
6.1.5.1. Análisis del diseño de aforador	48

6.1.5.2. Análisis del diseño metodológico	49
DIAGRAMA DE PROGRAMACION DEL EQUIPO DE MEDICIÓN	59
SENSOR ULTRASÓNICO Y DE TEMPERATURA	60
TARJETA DE MEDICION Y MEDIDOR COMPLETO	60
6.1.6. Construcción de estructura móvil para medición de caudal	61
6.1.7. Instalación de estructura móvil y caudalímetro ultrasónico	64
6.1.8. Información obtenida del medidor	67
6.2. Pluviómetro de autosifonamiento	67
6.2.1. Prototipo de pluviógrafo	70
6.2.2. Instalación del pluviógrafo en campo	72
7. CONCLUSIONES	74
8, BIBLIOGRAFÍA	75

1. RESUMEN EJECUTIVO

El sistema del diseño hidrológico del terreno con el método de la Línea Clave fue desarrollado originalmente en Australia en los años 50's del siglo pasado. El sistema tiene un enfoque fuertemente holístico y su eje fundamental es la absorción de agua por el suelo. El método ha demostrado que es posible asegurar agua para todos los usos en fincas y ranchos mediante un conjunto de acciones que implican la preparación del terreno siguiendo un patrón diferente al de las curvas a nivel. Esta técnica puede emplearse en terrenos de uso frutícola, forestal y pecuario, además de tener aplicación en el diseño de unidades de producción que van desde media hectárea hasta miles de kilómetros cuadrados.

La metodología mencionada es prácticamente desconocida en México y se considera que tiene mucho potencial y es de beneficio para las áreas agropecuarias del país donde se carece de agua de riego. Con el propósito de ahondar en el conocimiento de este sistema y comprobar sus bondades en el medio agrícola, se planteó el presente proyecto en el cual se buscaron dos predios en la región del oriente del estado de Morelos, donde se diseñó y realizó el laboreo el terreno de uso agrícola de acuerdo al método del diseño hidrológico del terreno con la Línea Clave (Keyline)

Los predios se localizan en el poblado de Amayuca, municipio de Jantetelco, Morelos. Las superficies de las parcelas son de 1.6 y 0.57 ha, ambas dedicadas al cultivo de sorgo forrajero. Los suelos son delgados clasificados como regosol-vertisol con profundidades máximas de 30 cm. La precipitación media anual en la zona es del orden de 865 mm y la altitud de 1,405 msnm.

Los resultados encontrados indican que en efecto, el suelo con el trazo del terreno con el método de la Línea Clave retiene por más tiempo una mayor cantidad de agua en el suelo. Esto, especialmente en las crestas o lomos del terreno, a donde es conducida gracias a la dirección del surcado en el terreno, siendo esta precisamente la característica del método en cuestión. Los resultados son bastante alentadores y en todos los casos muestran la tendencia de aumento del contenido de humedad del suelo en las crestas del terreno. En cuanto al rendimiento del cultivo de sorgo se tuvo un incremento del 13% al pasar de 5,800 kg/ha a 6,590 kg/ha, confirmando así la bondad del sistema.

La construcción de un prototipo de pluviógrafo digital y una estructura del tipo aforador de garganta larga, basados ambos en el medidor ultrasónico de caudal y ambos equipados con sistema de telemetría, harán posible que en trabajos futuros similares al aquí reportado se tenga una mayor captura de información, además de tener gran aplicación en estudios del proceso lluvia-escorrentamiento-erosión, tema de fundamental importancia en el manejo integral de cuencas, tópico de particular interés para la Subcoordinación.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Aumentar la producción y productividad del suelo orientada a obtener más alimentos, mediante el aprovechamiento pleno del agua de lluvia que se desperdicia en los escurrimientos de las fincas.

2.2. Objetivos específicos

- Preparar el suelo para tener una mayor absorción y retención del agua de lluvia sobre el terreno.
- Almacenar en el propio suelo agua que de otra forma se perdería como escurrimiento superficial, permitiendo a la vegetación mejores condiciones de desarrollo al tener por más tiempo una mayor humedad en el suelo.
- Aplicar la metodología del diseño hidrológico del terreno en una finca del estado de Morelos.

3. ANTECEDENTES

En las zonas agrícolas, frutícolas, pecuarias y forestales de temporal de nuestro país no se aplican en general, sistemas eficaces para captar agua de lluvia que permitan hacer un mejor aprovechamiento del agua que se precipita, de tal manera que no se pierda este preciado líquido, limitado en gran parte del territorio nacional, como lo es por ejemplo el noroeste mexicano. Para maximizar el aprovechamiento de esta agua de lluvia en los diversos usos del suelo del agro nacional, una alternativa adecuada es el impulso de métodos y técnica del tipo “diseño y trazo hidrológico de terrenos”. Con esta tecnología se pueden manejar y aprovechar los escurrimientos a nivel de microcuencas y fincas, donde actualmente se desperdicia el agua precipitada al dejarla pasar y que simplemente continúe su camino hacia aguas abajo.

El método del diseño hidrológico del terreno no es algo nuevo, aunque sí casi desconocido en México. Sus orígenes se remontan a los años 50's en Australia, donde un hombre dedicado a la minería, P. A. Yeomans, observó la creciente erosión y desertificación del paisaje australiano, relacionando esta situación con la agricultura. El sistema que él planteó combina la captación y conservación del agua, aunado a técnicas de regeneración del suelo y demostró en miles de hectáreas, que en ambientes con 600 mm de precipitación anual, es posible asegurar agua para todos los usos productivos en las fincas, mediante un conjunto de acciones que incluyen el trazo y preparación del terreno siguiendo un patrón diferente a las curvas de nivel, convirtiendo así al propio suelo en el mejor almacenador de agua de lluvia.

Con el propósito de comprobar y difundir las bondades de esta metodología en el medio agrícola del estado de Morelos, especialmente en su región de menor precipitación, se plantea el presente proyecto, en el cual se espera mostrar que con el sistema del diseño hidrológico del terreno, se continuará teniendo la misma cantidad de lluvia que antes, pero la diferencia es que ahora, el agua

será retenida por más tiempo en el terreno, en lugar de dejarla escapar en forma de escurrimiento superficial. Ahora habrá más humedad en el suelo, más vegetación y por lo tanto más raíces. Si todo lo anterior es bien manejado, se puede acelerar la formación de suelo fértil y capturar CO₂. Con más humedad y vegetación, se mejora la productividad agrícola del suelo, se embellece el paisaje y se contribuye a la estabilización del clima.

Con el presente proyecto se busca avanzar en el conocimiento del diseño hidrológico del terreno y demostrar que es posible aumentar la humedad del suelo, con lo que se contribuirá de manera importante en la conservación y mejor aprovechamiento de los recursos suelo y agua del país, lo que finalmente hará posible aumentar la producción de alimentos.

4. METODOLOGÍA

Para la realización del presente proyecto se estableció y siguió el procedimiento que a continuación se resume:

- Revisión de literatura sobre la metodología del Diseño Hidrológico del Terreno (Línea Clave o Keyline).
- Búsqueda, localización y gestión de sitio(s) para la realización del proyecto. Zona del estado de Morelos con precipitación limitada (región oriente). Recorridos de campo y concertación con propietario de predio(s).
- Levantamiento topográfico de los sitios seleccionados. Con utilización de estación total, nivel topográfico y aparato de posicionamiento geográfico GPS.
- Diseño del sistema hidrológico del terreno en gabinete y en el terreno. El diseño en gabinete se realizó utilizando el software Power Point de Microsoft Office y en terreno con apoyo del nivel topográfico y estacas de madera.
- Establecimiento del sistema en el terreno. Realizado con tractor agrícola y sembradora con arado de vertedera de cinco surcos.
- Establecimiento de sensores de humedad del suelo para monitoreo de esta variable. El monitoreo del contenido de humedad se llevó a cabo empleando equipo TDR y el método gravimétrico (diferencia entre peso de suelo húmedo y peso de suelo seco), con secado de muestra en estufa eléctrica.
- Evaluación de las variables hidrológicas en el terreno (contenido de humedad del suelo). Captura, clasificación y análisis de los valores de humedad del suelo durante la duración del proyecto.
- Para la difusión de la metodología se preparó un manual técnico y una unidad educativa audiovisual (video), donde se presentan las bases del sistema y su implementación en campo.

5. RESULTADOS

5.1. Revisión de literatura sobre el Diseño Hidrológico del Terreno

Los orígenes del diseño hidrológico del terreno o sistema Keyline (Línea Clave) se remontan a los años 50's del siglo pasado. Durante los años 50's y hasta finales de los 70's la literatura generada al respecto es casi de autoría exclusiva del creador del sistema; el australiano Percival Alfred ("P. A.") Yeomans (1905-1984). Aunque la metodología fue probada y comprobada en diversos sitios de Australia, donde se evidenció la eficiencia del sistema en el manejo y conservación del agua y regeneración del suelo en terrenos de usos agrícola, ganadero y forestal, el método tuvo poca difusión y ha permanecido casi ignorado fuera de Australia. En México, hasta el momento presente esta técnica es prácticamente desconocida y en general la literatura al respecto en idioma español es casi inexistente. El método se ha dado a conocer hasta después del fallecimiento de su autor, gracias al trabajo de algunos personajes en diversas partes del mundo inmersos en el tema de la permacultura, como Darren Doherty y Eugenio Gras. Ha colaborado también uno de los hijos del autor, Allan J. Yeomans, quien retomó la línea de trabajo de su padre y se dedica a escala mundial a la venta de servicios, asesorías y equipo agrícola que tiene como base los principios del sistema Keyline. Su página electrónica es <http://www.yeomansplow.com.au/>

P.A. Yeomans antes de descubrir el sistema se dedicó a varios oficios, sobresaliendo en la actividad minera. Fue en esta área de trabajo donde ganó experiencia en la importancia del movimiento del agua en el suelo en función de la topografía del terreno. Esto le sirvió luego para aplicarlo en el campo agrícola; él estaba convencido de que un manejo inteligente del agua en la agricultura podría hacer exitosa esta actividad en Australia, país que es conocido por su impredecible patrón climático especialmente en cuanto a precipitación se refiere.

Yeomans observó que los agricultores ignoraban los aspectos biológicos del suelo y que con la práctica de "voltear" el suelo con los arados de vertedera y disco, se estaba realmente destruyendo la fertilidad de los suelos. Se dio cuenta asimismo que las recomendaciones de las instituciones oficiales para el manejo y conservación de agua y suelo estaban resultando infructuosas. Con sus conocimientos de topografía se dio cuenta que cuando se cultiva la tierra siguiendo las curvas de nivel, pronto llega un momento en que el surcado se desvía de la verdadera curva de nivel, lo que ocasiona serios problemas en el manejo del agua en la parcela. Descubrió que haciendo una combinación de curvas a nivel con un surcado "no en contorno" permitía de manera selectiva enviar el agua de las partes bajas del terreno (normalmente más húmedas) hacia las crestas o "lomos" del terreno (que son las áreas secas) manteniendo entonces una mayor humedad en el suelo. Esto resulta muy beneficioso para el desarrollo de cultivos y formación de suelo.

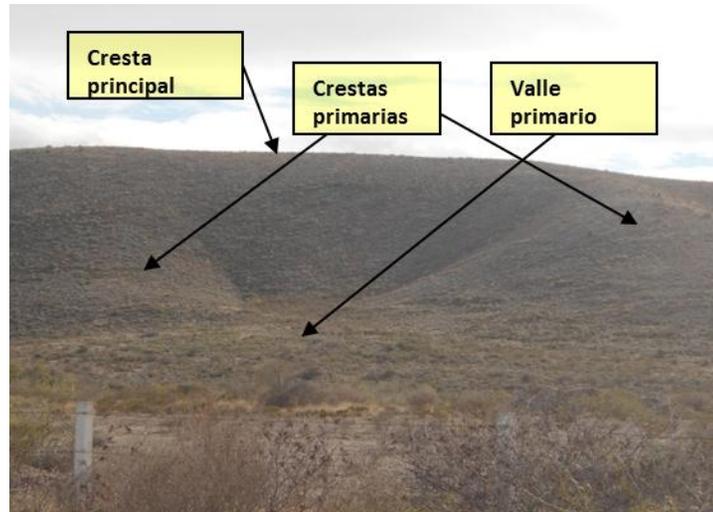
Su experiencia en el manejo del agua en la minería le permitió tener la idea de coleccionar agua y almacenarla en el terreno mismo para su mejor distribución y aprovechamiento por las plantas. Con este manejo del agua y la adición de fertilizantes orgánicos al suelo, él estaba creando un sistema de "agricultura sustentable" aun antes de que el término fuese acuñado. Yeomans llevó a la práctica sus originales ideas en terrenos de su propiedad y de esta forma nació el diseño hidrológico del terreno, que el bautizó como método del "Keyline" (Línea Clave).

5.1.1. Los principios del sistema y su base topográfica.

Para entender el diseño hidrológico del terreno es necesario aprender a leer el paisaje y descubrir las líneas naturales del agua y las curvas de nivel del terreno. En un paisaje natural, hay que identificar el parteaguas, las crestas o lomos y los valles en las geoformas naturales del terreno. Estas geoformas son básicas para la aplicación del sistema. A las partes bajas del terreno, se les llamará “valles”. El valle se entiende no como un cauce; es la parte plana que se encuentra al pie de las formaciones onduladas o montañosas. En dado caso, la parte inicial del valle, en la parte alta del mismo, es donde descarga un símil de cauce y de ahí se expande el agua de escurrimiento en todo el terreno, perdiéndose la forma de un cauce definido si es que aguas arriba si existía.

Las otras formas de interés en el terreno son las llamadas “crestas” o parteaguas. Las crestas o lomos del terreno no son otra cosa que los parteaguas de los lomeríos que ocurren en el terreno natural y que envían los escurrimientos hacia sus partes bajas, que aquí se llamarán “valles primarios”. Entonces, entre dos crestas o lomos existe un valle y complementariamente, entre dos valles existirá una cresta o lomo. La porción de terreno que existe entre una cresta primaria y otra, se conoce como unidad primaria del terreno. Un valle tiene como límite superior el inicio de la zona de pendiente fuerte, donde está el punto de inflexión en la pendiente. Las fronteras laterales serán una cresta o lomo de cada lado, que aquí serán llamadas “crestas primarias”. El límite inferior será un arroyo o cauce bien definido o bien un cambio fuerte de pendiente. Los conceptos antes mencionados son mejor entendidos si se observa con detalle la Fotografía 1 y la Figura 1, donde pueden reconocerse las crestas y valles, así como las “unidades primarias del terreno” que en general pueden definirse como la parte plana o valle del terreno que yace entre dos crestas primarias a sus lados.

En el paisaje o terreno, aquel punto donde la pendiente de una ladera cambia de mayor a menor, se le denomina Punto Clave, Punto de Inflexión o “Keypoint” (en inglés). Este punto es de fundamental importancia en el sistema. Este mismo punto es ideal para localización de bordos para almacenamiento de agua y en trabajos de conservación de suelos por erosión, es aquí donde se deben iniciar las obras, pues es normalmente donde se inicia la formación de cárcavas.



Fotografía 1. Crestas y valles en el paisaje del terreno.

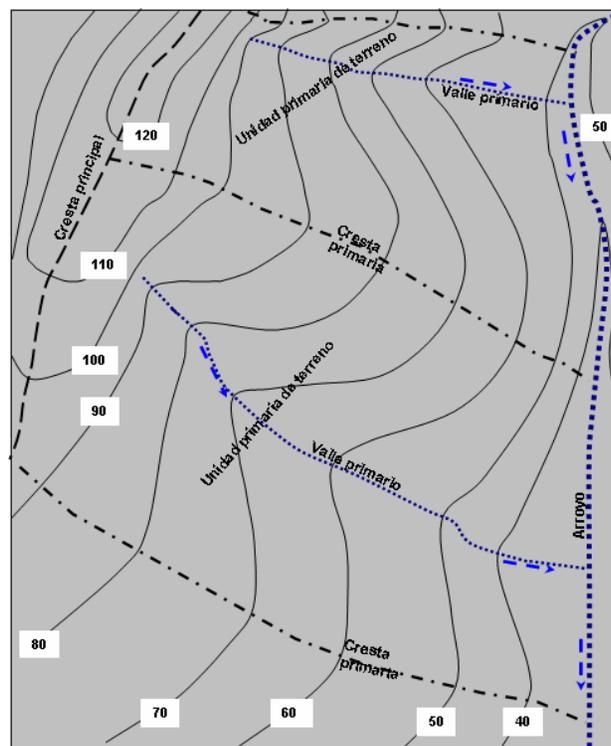


Figura 1. Mapa de curvas a nivel identificando crestas y valles.



Fotografía 2. Identificación del “Punto Clave”.

En un mapa topográfico, el Punto Clave (Keypoint) se localiza donde las curvas de nivel cambian visiblemente su distancia (cota de altitud) entre sí. Si se tiene una cierta distancia entre las curvas de nivel, y de pronto esta distancia se aumenta de manera visible, esto indica que se está cambiando de una pendiente fuerte, a una más suave. En el sistema de Línea Clave, la curva de nivel que pasa por el punto clave se denomina Línea Clave o Keyline y ésta es la base para desarrollar el diseño hidrológico del terreno. Todo el sistema está basado en una línea o varias “Líneas Claves” donde al roturar el suelo, lo que se pretende es que penetre en el suelo la mayor cantidad de agua de lluvia posible. Con ello se reduce el escurrimiento, la erosión y la evaporación. Al haber una mayor cantidad de agua en el suelo y por más tiempo, aunado a los contenidos de aire, temperatura y microorganismos, se promueve la formación de suelo al facilitar el aumento de su profundidad, incrementando colateralmente su fertilidad e implícitamente depender cada vez menos de los fertilizantes químicos. Al tener un suelo más profundo, hay más espacio para las raíces, formando más suelo y capturando más CO₂, lo que finalmente contribuye en el complejo tema del cambio climático, un problema de actualidad mundial y en el que la labranza y formación de suelo cumple un papel fundamental.

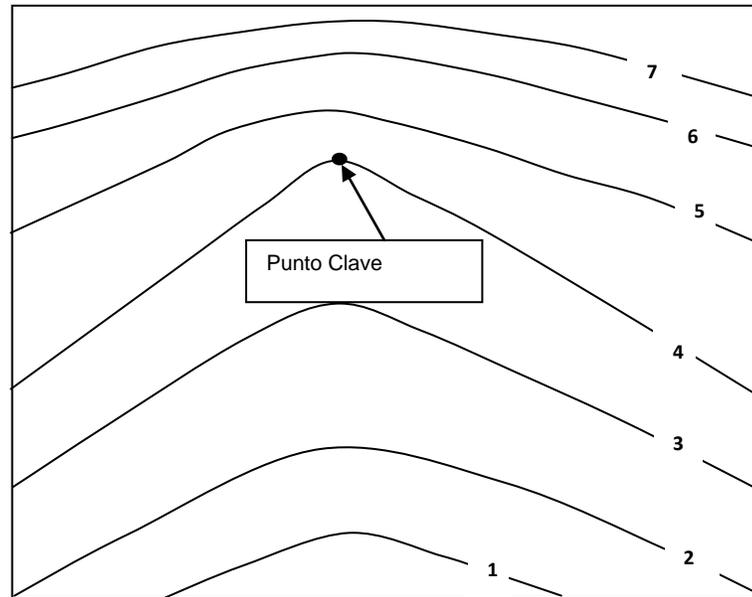


Figura 2. Mapa de curvas a nivel identificando el Punto Clave.

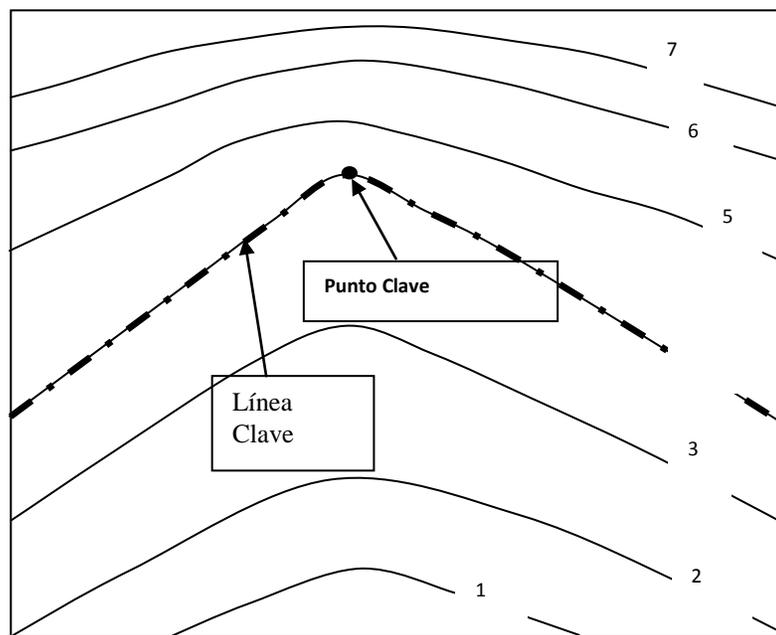


Figura 3. Mapa de curvas a nivel identificando la Línea Clave.

5.1.2. Los beneficios al suelo con el manejo hidrológico del terreno en Línea Clave.

El diseño hidrológico del terreno con el sistema de la Línea Clave combina la captación y conservación del agua con técnicas de regeneración del suelo, siendo capaz de restaurar suelos degradados, haciéndolos menos vulnerables ante las sequías y dado su enfoque holístico, considera favorable el uso de animales de pastoreo en el proceso. El diseño con Línea Clave es útil tanto en agricultura como en ganadería y desarrollos forestales, siendo así de gran beneficio al suelo a y sus propietarios, además de cumplir con las exigencias ecológicas actuales al jugar un papel importante en la captura de CO₂, captar y almacenar el agua y reducir la erosión de suelos. Con el diseño del terreno en Línea Clave, se aprende a ver la agricultura de otra manera. No obstante que se tiene la misma cantidad de lluvia, se dispondrá ahora de mayor humedad en el suelo con los beneficios que ello conlleva.

Una vez que se tiene el dominio del método, es relativamente sencillo en un terreno o sitio dado, poder determinar donde se pueden hacer canales de desviación para captar agua, donde hacer los bordos de almacenamiento y tamaños de los mismos, en donde irán los canales de distribución de agua para riego, qué áreas se dejarán sin tocar, dónde se plantarán o cortarán árboles, dónde se ubicará la zona de riego, dónde el área de captación, en qué lugar quedan mejor las construcciones agrícolas, la casa habitación, las cercas y los caminos en una propiedad dada. Es decir, se puede diseñar el paisaje del terreno en una total armonía con el entorno natural. Y siempre el diseño estará en función de un mejor aprovechamiento del agua, tomando en cuenta para ello la escala de permanencia recomendada por la metodología: 1) El clima, 2) la topografía, 3) el agua, 4) los caminos, 5) los árboles, 6) las construcciones, 7) las divisiones y cercas y 8) el suelo. En contraste con la escuela de conservación de suelos americana, en este sistema el suelo se considera al final, dado que se parte de la premisa que esta componente es factible de modificarse por el manejo que el hombre haga del mismo.

En la actualidad, para México y para el mundo en general, el cambio climático, la escasez y correcta gestión del agua, así como la erosión y degradación de los suelos, son grandes problemas altamente correlacionados entre si y representan grandes conflictos medioambientales. El origen de todos estos problemas, al menos en gran parte, viene del suelo: la deforestación y manejo inadecuado del suelo en el sector agropecuario y el derroche del agua en zonas rurales y urbanas, se traduce todo en los problemas citados. Afortunadamente, también en el suelo está gran parte de la solución. Una forma de atacar estas dificultades ambientales es desarrollar un suelo fértil y biológicamente activo, capaz de retener el agua de lluvia en el lugar que cae y capaz de retener grandes cantidades de CO₂ atmosférico.

Este es precisamente el objetivo del diseño hidrológico del terreno con sistema de la Línea Clave: aprender a diseñar y gestionar inteligentemente el paisaje agrícola y pecuario, con el fin de aprovechar al máximo los recursos hídricos y restituir al suelo su profundidad y fertilidad natural. Con un suelo sano se reduce la necesidad de administrar fertilizantes y otros insumos agrícolas químicos que resultan en graves daño al medioambiente y al mismo ser humano.

5.1.3. El eje fundamental del sistema: la absorción de agua por el suelo

El empleo del método de la Línea Clave en la agricultura implica simplemente hacer el surcado paralelo a la línea clave. Es recomendable hacer uso de un implemento similar al cincel, aunque este es de timón muy delgado y en la parte inferior, en el pico roturador, se coloca una especie de “zapatilla” que es la que va dejando una especie de túnel que es por donde se desplazará el agua de manera subsuperficial. Para este propósito, Yeomans, el autor de la metodología creó su propio implemento (aun no es comercializado en México). Si no se cuenta con el implemento original, se puede hacer uso del arado de cinceles. Lo que cuenta finalmente es hacer la última labor agrícola en sentido paralelo a la línea clave. Al hacer la siembra siguiendo este método, el campo queda como se muestra en la Figura 4.

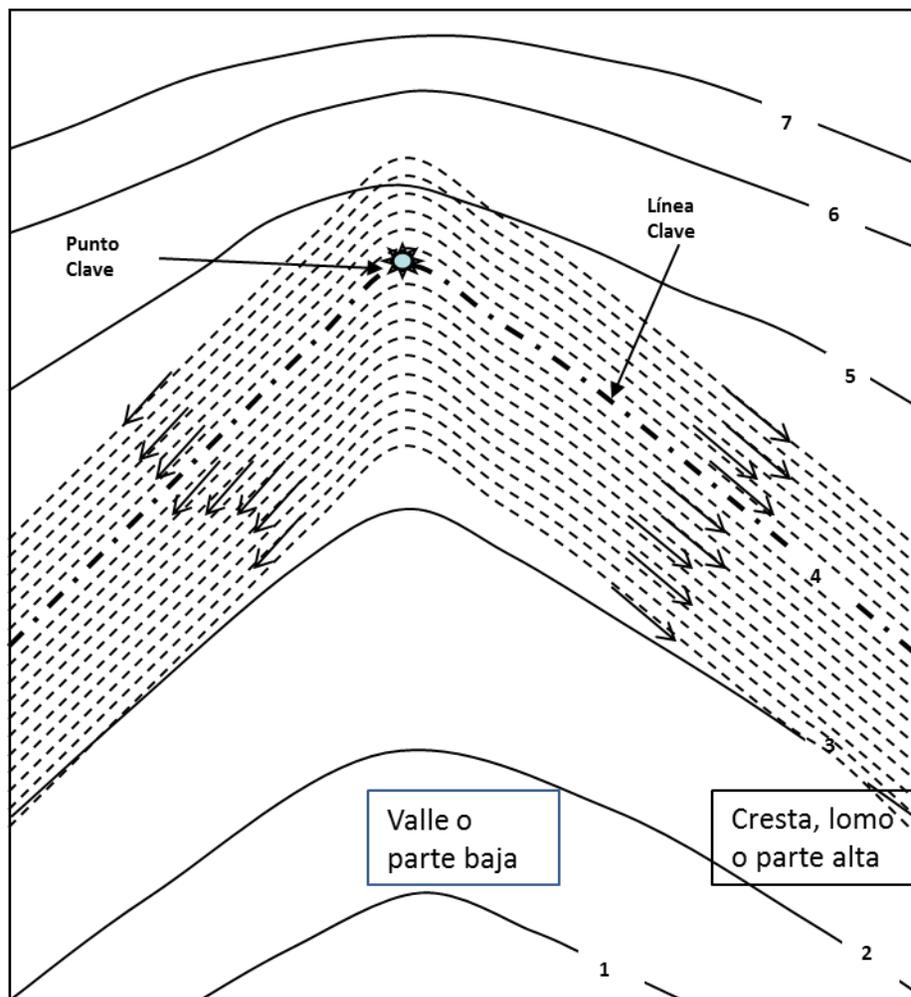


Figura 4. Surcado del terreno en Línea Clave.

Puede verse que al realizar el surcado paralelo a la Línea Clave el agua es conducida de la parte baja o valle de la parcela, hacia la parte alta, lomo o cresta del mismo terreno. De esta forma se

aprovecha mejor el agua de lluvia, pues ahora en vez de permitir que el agua se escape fluyendo por la parte baja del terreno, ésta se enviará a su “parte alta” permaneciendo así el esta parte del terreno más húmeda. Observe que al hacer el surcado paralelo a la Línea Clave, tanto hacia arriba como hacia abajo de la misma, en la parte central de la parte baja del terreno, el surco queda por arriba de la curva de nivel, y a medida que se aleja del centro y va hacia la cresta del terreno, el surco cruza la curva de nivel y se aleja hacia abajo de la misma, lo que garantiza el flujo del agua de lluvia, del valle, hacia el lomo o cresta del terreno. Esto no sucede en el surcado en curvas a nivel, según puede verse en la Figura 5.

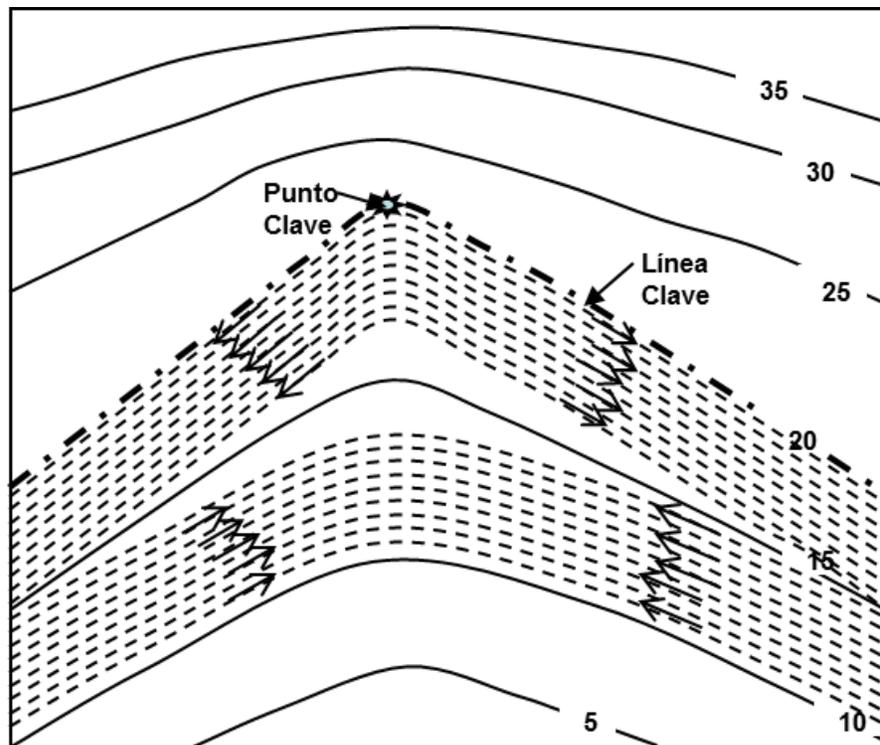


Figura 5. Surcado en Curvas a Nivel.

Observe en este caso como hay partes en el terreno (parte alta del dibujo) donde se envía el agua del valle hacia la cresta del terreno, pero en otras partes (como se ve en las líneas de la parte inferior del dibujo) se hace lo contrario: el agua se envía de la parte del lomo o cresta, hacia la parte baja del terreno, aumentando entonces la concentración de agua en esta parte, de donde vendrá indudablemente el aumento del escurrimiento superficial, la ruptura de surcos y consecuentemente una mayor erosión del suelo.

5.1.4. Aumento de fertilidad por absorción de agua y año de conversión.

El diseño hidrológico del terreno con el método de la Línea Clave tiene como base de su éxito el hecho de que al abrir el suelo con un implemento que rompa el suelo pero sin que lo voltee, facilita el ingreso del agua al suelo y no destruye la micro flora y fauna existente en el terreno. Ésta

delgada abertura del terreno en la superficie, realizada con un arado de cincel, subsolador o algún implemento similar (Yeomans diseñó su propio equipo), permite al suelo absorber una mayor cantidad de agua y retenerla en su interior por más tiempo. Esto no ocurre cuando se hace el laboreo del terreno con un arado de vertedera o de disco, que voltean el suelo y detienen el desarrollo natural del suelo. Al tener el suelo mayor humedad y aunado esto con el oxígeno, la temperatura y otros elementos vitales, se contribuye a transformar el subsuelo en un suelo vivo, al lograr una descomposición más rápida de los residuos vegetales que quedan en el suelo después de la cosecha, así como de las plantas arvenses que naturalmente crecen en el terreno.

Debe también decirse que es de fundamental importancia en este método la profundidad con que se realiza el trabajo del primer año. El método sugiere que al inicio la profundidad sea de alrededor de 10 cm e ir aumentando ésta de 2 a 5 cm en los dos o tres años posteriores, de tal manera que en el tercer o cuarto año se tendrá ya un suelo profundo y de excelente fertilidad natural. Estas recomendaciones se basan en que no tiene caso realizar labores demasiado profundas ya que, por ejemplo, en un suelo arcilloso compacto, un laboreo profundo es en realidad una pérdida de tiempo y dinero, pues el suelo se impermeabilizará muy pronto con las primeras lluvias. No tiene sentido realizar labores agrícolas a una gran profundidad si no se puede obtener una mejora del suelo de forma definitiva.

Al hacer el laboreo a poca profundidad y luego incrementarla hasta llegar a una profundidad de alrededor de 30 cm (dependiendo de tipo y profundidad del suelo, nunca más allá de 45 cm), lo que se está haciendo es que se le está dando la oportunidad a los microorganismos existentes en el suelo para que poco a poco vayan haciendo su trabajo e ir generando más suelo. No tiene caso profundizar el laboreo si los microorganismos no serán capaces de volver a la vida a un suelo muerto con un espesor de digamos, 20 cm de un solo golpe. Al primer año en que se hace el trabajo con el método de la Línea Clave, Yeomans le llamó “año de conversión”, dado que se pasa de una agricultura que él denominó como de extracción o minera, a una agricultura de fertilidad por absorción de agua. Este proceso será más rápido si al arado abridor o cincel, se le adiciona un recipiente o contenedor de tal manera que además de la roturación del suelo, se va agregando composta o un té de composta. El hecho de enriquecer los microorganismos del suelo y facilitarles mejores condiciones de humedad, temperatura y flujo de aire, hace que el suelo cada año se vaya haciendo más profundo y más fértil, sin tener la necesidad de las aplicaciones de fertilizantes químicos, que según Yeomans, son solo estimulantes para el crecimiento vegetal, pero que no consideran en absoluto el desarrollo del suelo. De hecho la “agricultura “moderna”, en la práctica, toma al suelo como un ser sin vida y solo lo usa como medio de soporte para los cultivos. Con el método de la línea clave, aplicada como es su concepción original, se reduce el empleo de químicos y se incrementa la profundidad del suelo (permitiendo mayor retención de CO₂) en las actividades agrícolas, pecuarias y forestales. Esto finalmente contribuye de manera directa en la disminución de los efectos del cambio climático en el mundo.

5.2. Localización y gestión del predio de trabajo

Cabe aquí aclarar que el Diseño Hidrológico del Terreno con el método de Línea Clave es más recomendado en zonas de media a baja precipitación. En zonas lluviosas, aunque la metodología puede utilizarse, tendrán que hacerse algunas adaptaciones, pues como fue originalmente diseñada, su propósito es retener en el suelo, in situ, el agua de lluvia, cosa que no siempre es deseable en las áreas de altos índices de precipitación. Así entonces, para la localización de algún

sitio potencial para el desarrollo del proyecto se realizaron recorridos de campo por el oriente del estado de Morelos. Esta zona del estado es donde se tiene mayor área dedicada a la agricultura y es también una región que muestra bajos índices de precipitación.

Como resultado de estos recorridos de campo se identificaron algunos sitios potenciales. Posteriormente, se procedió a realizar la gestión con los propietarios de los mismos para lograr su acuerdo y cooperación, en el sentido de facilitar sus terrenos para implementar el método objeto del presente informe. Finalmente se concertaron dos predios en el poblado de Amayuca, municipio de Jantetelco, Morelos. Una de las parcelas tiene una superficie aproximada de 1.6 ha y la otra de 0.57 ha, ambas dedicadas al cultivo de sorgo de temporal. Los suelos son delgados, con una profundidad no mayor a los 30 cm. Su clasificación es de regosol mezclado con vertisol textura media, y fase pedregosa. La altura del predio es de 1,405 msnm y la precipitación media anual es de 865 milímetros.

El acceso a las parcelas es por la carretera Cuautla – Puebla, a la altura del poblado de Amayuca. En dirección Cuautla-Puebla, aproximadamente un kilómetro y medio después de la desviación hacia Amayuca, se toma una salida de terracería a la derecha y aproximadamente a un kilómetro de la carretera se encuentra la parcela de mayor tamaño. El predio colinda hacia el oriente con una barranca y la otra parcela se localiza al otro lado de la misma.

A continuación se muestra en imágenes de Google Earth las figuras que permiten tener una mejor idea de la localización de los predios en donde se realizó la implementación del sistema del diseño hidrológico del terreno con el método de la Línea Clave.



Figura 6. Localización del sitio en Amayuca, Morelos.

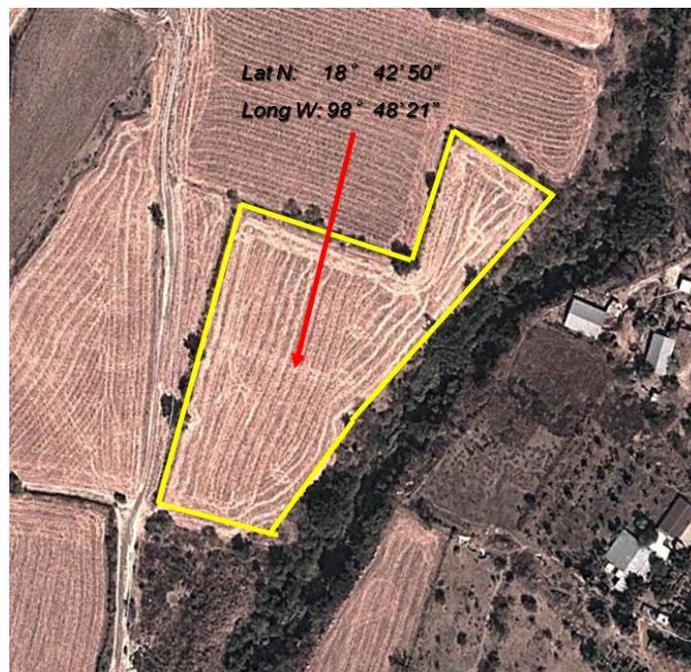


Figura 7. Un acercamiento a la parcela 1 en Amayuca, Morelos.

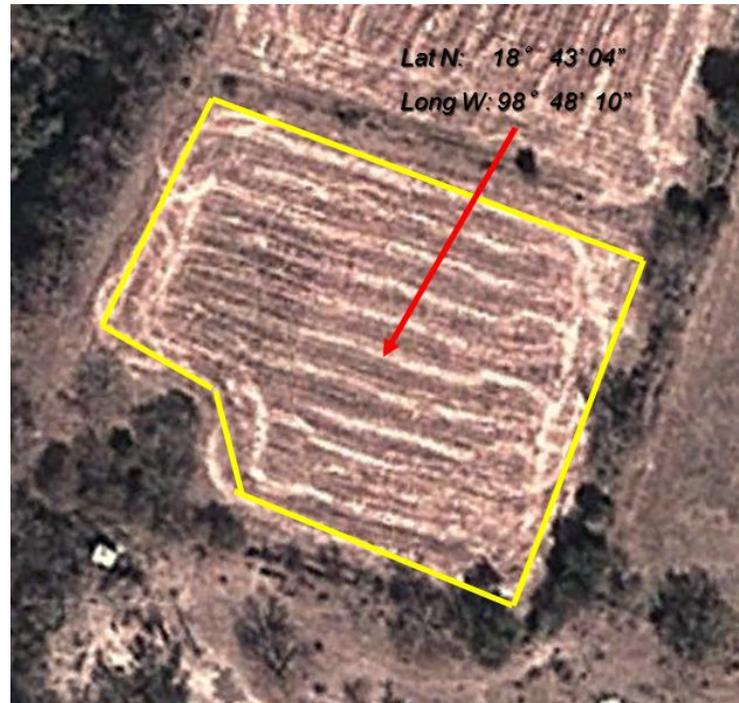


Figura 8. Un acercamiento a la parcela 2 en Amayuca, Morelos.

5.3. Levantamiento topográfico de los sitios seleccionados

Un paso importante para el establecimiento del diseño hidrológico del terreno es la realización del levantamiento topográfico del terreno, pues se requiere conocer las curvas de nivel de donde habrá de llevarse a cabo el trazo del sistema. En el presente caso el trabajo topográfico consistió en el levantamiento altimétrico y planimétrico del terreno. De esta forma se obtuvo la superficie de los terrenos seleccionados y la pendiente existente en los mismos. Se realizó asimismo una caracterización general de los sitios. En ambos casos, el suelo es regosol-arcilloso, con limos y arenas. Los muestreos fueron realizados de manera aleatoria y se encontró que en promedio la profundidad del suelo es como máximo de 30 cm, encontrándose debajo de esta capa material endurecido conocido como tepetate.



Fotografía 3. Trabajos de levantamiento en Amayuca, Morelos.



Fotografía 4. Muestreando profundidad del suelo sitio Tehuixtla.

Un análisis de las curvas de nivel y conjuntamente con observaciones de campo hicieron posible detectar el Punto Clave (Keypoint) en el terreno. Luego la curva de nivel que pasa por ese punto clave se transforma en la Línea Clave y de ahí se desprende la aplicación del método.

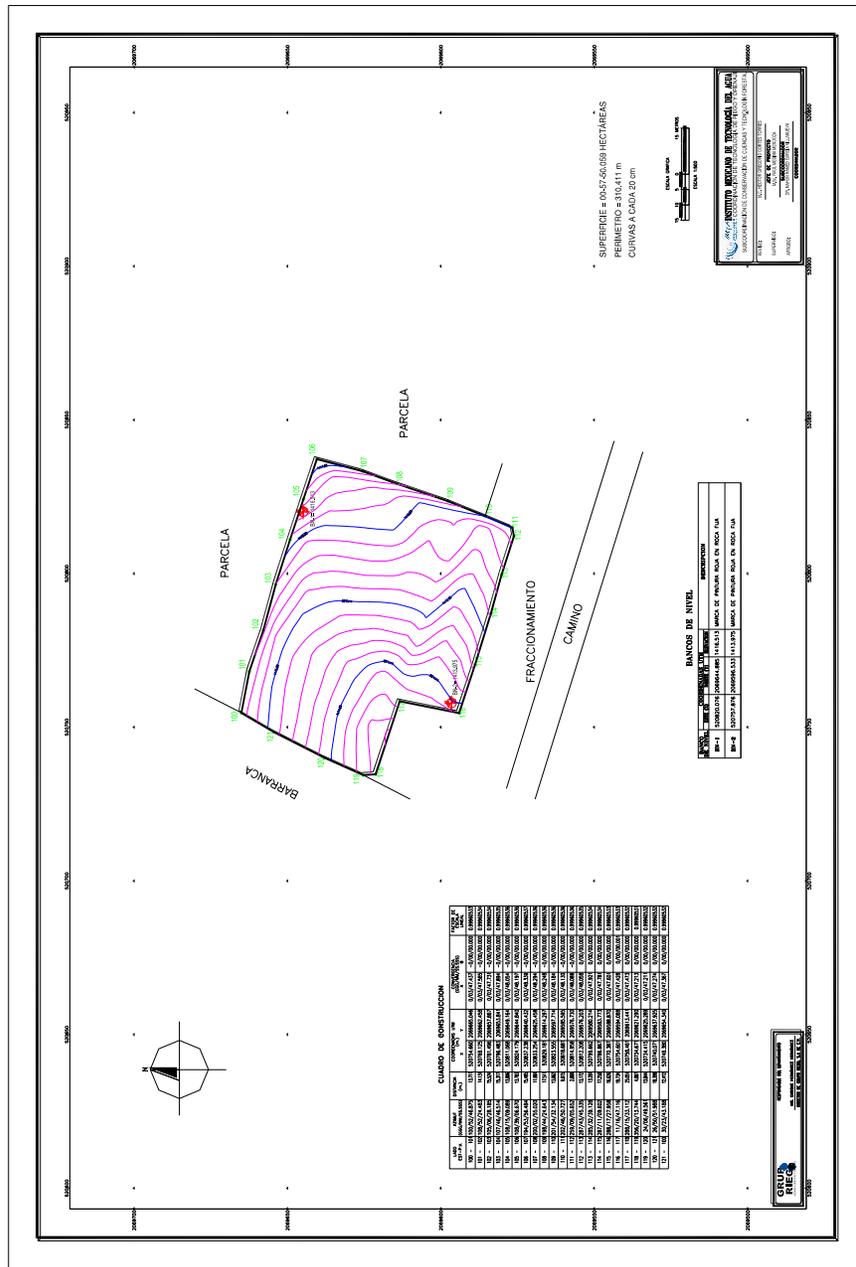


Figura 10. Plano curvas a nivel de la parcela 2. Amayuca, Mor.

Debido a la escala de presentación de los planos, no se alcanzan a apreciar los datos numéricos, pero para ambos casos, las curvas de nivel son cada 20 cm. El desnivel total en la parcela de mayor tamaño es de 5 metros con pendiente promedio de 2.8% aunque ésta varía desde 2% hasta 5.5% pues la topografía no es totalmente uniforme. En la parcela de menor tamaño (alrededor de 0.57 ha) el desnivel total es de tres metros con una pendiente promedio de 4% y una variación de la misma que va del 3.6% hasta el 5%; es decir se tiene una mayor pendiente en esta parcela que en la anteriormente mencionada.

5.4. Diseño del sistema en gabinete y en el terreno

El primer elemento de insumo para el trazo del sistema en gabinete y posteriormente en campo, es disponer del plano del sitio de interés con curvas a nivel. Dependiendo de la pendiente en el terreno, es conveniente trazar las curvas de nivel cada metro, aunque puede ser menos (medio metro o incluso cada 20 centímetros) si el terreno es muy plano y a más de un metro si la pendiente del sitio es relativamente fuerte. Una vez que se dispone del plano con curvas a nivel, auxiliándose en el reconocimiento de campo, se elige el Punto Clave, cuya curva de nivel se transforma en Línea Clave. A partir de esta línea se hace el trazo de los surcos, paralelos a dicha línea, tanto hacia arriba como hacia debajo de la misma. Es posible que, por el tamaño y pendiente del terreno a trabajar, no se tenga una línea clave bien definida, o es posible que se tenga más de una. Si se tiene más de una, se hará el surcado según el área de la Línea Clave que le corresponda.

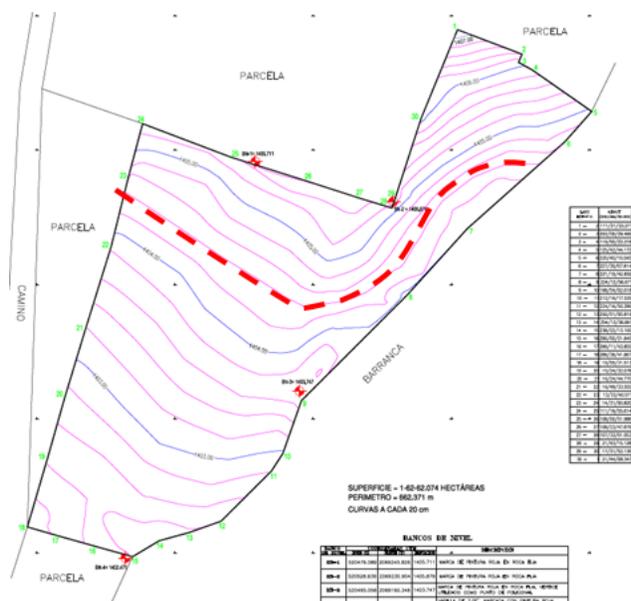


Figura 11. Parcela 1 con Línea Clave marcada. Amayuca, Mor.

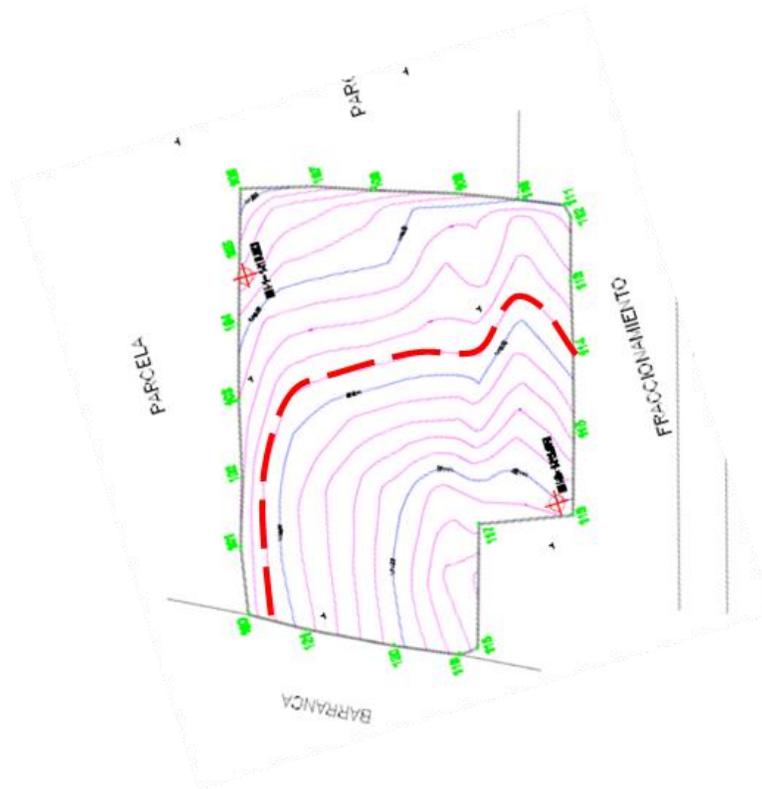


Figura 12. Parcela 2 con Línea Clave marcada. Amayuca, Mor.

Por otra parte, si no se tiene una Línea Clave en el terreno, lo que se hace es: si la curva de nivel tiene la curva hacia abajo (lomo o cresta) se elige una de las curvas de nivel de la parte más baja y se surca de manera paralela a ésta, hacia arriba de dicha línea y, por otro lado, si las curvas de nivel muestran la curvatura hacia arriba (depresión o valle) se escoge una de las líneas de la parte más alta y se surca de manera paralela a esta línea, de ahí hacia debajo de la misma. El surcado puede ser ligeramente diferente a la curva de nivel. Se puede “forzar” o asegurar el flujo del agua del valle hacia la cresta, lo que se hace para ello es que en la parte baja del terreno se sube el trazo un poco arriba de la curva de nivel y en la parte alta (lomo o cresta) se baja un poco el trazo del surco de dicha curva. La pendiente recomendada es del orden de 1:300 a 1:400 (0.25% a 0.33%) para garantizar un flujo lento y permitir que el agua penetre en el suelo al mismo tiempo que se evitan problemas de erosión en el terreno.

Así entonces, una vez definida la línea clave en el plano topográfico, se realizaron visitas a campo para verificar el punto en campo; esto para asegurar que se ha realizado una buena selección. El paso siguiente consistió en realizar el trazo del diseño en gabinete y posteriormente, trasladarlo a campo. El traslado a campo consiste en ir a campo y marcar con estacas la línea clave que habrá de servir de guía para realizar el surcado. Si la curva de nivel tiene variaciones en forma de zigzag, lo que se hace es suavizar la curva. Esto de hecho se llevó a cabo en ambos casos.

Una vez que se tiene el diseño del surcado en gabinete, se traslada entonces el trabajo al campo. Para esto es de gran apoyo equiparse con un nivel topográfico y un GPS. En el terreno no es necesario marcar cada curva de nivel, basta con marcar la Línea Clave (o Líneas Claves) previamente identificada en gabinete y dicha línea servirá como guía para la realización del trazo en el campo.



Figura 13. Trazo en gabinete del diseño hidrológico del terreno en parcela 1. Amayuca.

Es importante aquí mencionar que en la parcela 2, que es la de menor superficie, se hizo una división del terreno y se dejó una parte del predio para que el productor la surcara acorde a su costumbre. Esto sirvió para hacer una comparación del contenido de humedad en el suelo en la parte del predio donde se realizó el surcado acorde al diseño hidrológico del terreno y aquella parte en que se hizo el surcado de manera tradicional. En las siguientes figuras puede verse la división realizada y el diseño del surcado en ambas partes de la parcela.

En la primera imagen se muestra la división de la parcela. La parte del lado derecho es la que se dejó para que el productor hiciera el surcado acorde a la forma tradicional y la parte del otro lado es la que se surcó con el método objeto del presente informe.



Figura 14. Croquis del predio menor con división. Amayuca.

En la segunda imagen (Figura 15) puede verse la forma en que finalmente se diseñó el surcado en el predio. Puede verse que en la parte de la derecha el surcado es en forma recta, con la dirección del surcado en el sentido de la pendiente y en la parte izquierda se realizó un diseño de surcado acorde al método propuesto. Nótese que al definir la línea clave, se realizó un ligero ajuste (suavización) de la curva de nivel original. Como ya se ha dicho estos leves ajustes no perjudican la eficiencia del método del diseño hidrológico del terreno.

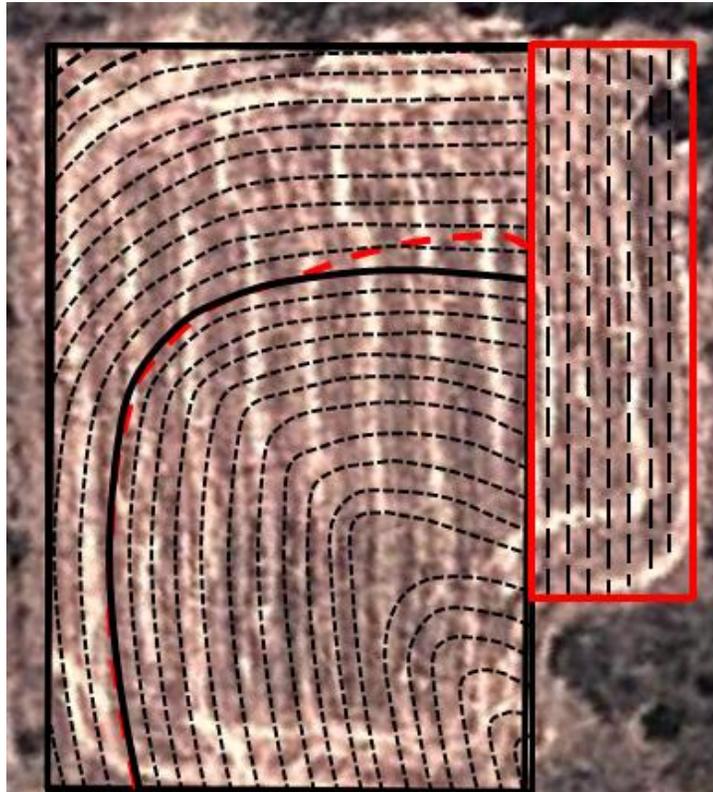
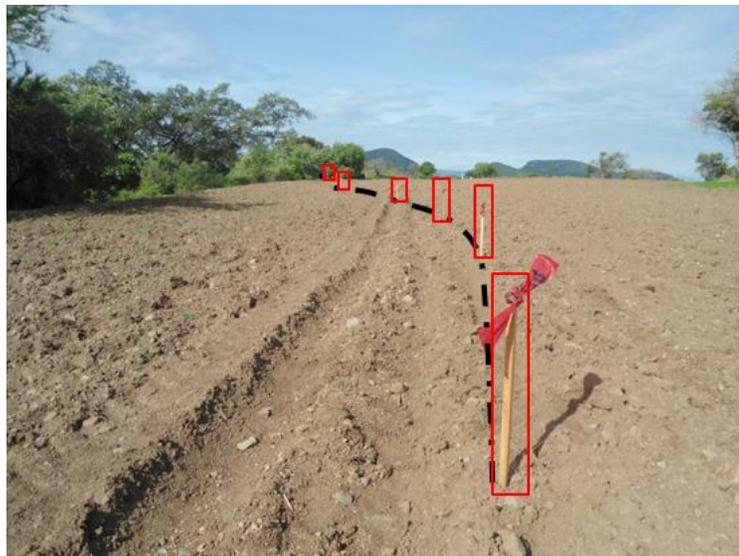


Figura 15. Diseño del surcado en cada sección de la parcela 2. Amayuca.

Una vez que se realizó el trazo del sistema en gabinete, el siguiente paso fue hacer realidad estos trazos en campo. Para ello, se inició con la ubicación del Punto Clave (Keypoint) en el terreno y posteriormente, con el apoyo de un nivel laser se marcó la curva de nivel que se identificó en gabinete como línea clave. Lo que se hizo entonces fue, con estacas de madera, marcar la curva de nivel mencionada. Posteriormente, para suavizar y afinar la curva lo que se hizo fue colocar una segunda estaca, apareada con la que marcaba la curva de nivel original. Posteriormente se retira la estaca que marca la curva de nivel original y se dejan las estacas que marcan la línea clave. Esta línea es la que siguió el tractorista al hacer el surcado de las parcelas con el método del diseño hidrológico del terreno.



Fotografía 5. Marcaje de Línea Clave en campo. Amayuca, Mor.



Fotografía 6. Línea Clave marcada en campo. Amayuca, Mor.

5.5. Establecimiento del sistema en el terreno.

Una vez estacado el terreno con la Línea Clave o línea guía para la dirección del surcado, lo que siguió fue indicar al tractorista que realizara el surcado del terreno siguiendo la línea de estacas. A continuación se muestran varias fotografías que permiten ver gráficamente el desarrollo del trabajo. En las imágenes se pueden apreciar el desarrollo del cultivo y cómo los surcos en efecto, no son rectos sino que siguen la dirección dictada por el diseño hidrológico del terreno.



Fotografía 7. Iniciando trazo de surcado en Línea Clave en Amayuca



Fotografía 8. Surcado en Línea Clave en proceso, en Alpuyeca.



Fotografía 9. Terreno surcado con el método de Línea Clave.



Fotografía 10. Cultivo en fase inicial de desarrollo surcado con el método de Línea Clave.



Fotografía 11. Cultivo en maduración surcado con el método de Línea Clave.

5.6. Evaluación de variables hidrológicas en el terreno.

Dado que la implementación del sistema promueve el envío del agua de escurrimiento directo por lluvia hacia la parte de la cresta o lomo del terreno, permaneciendo el agua en esta parte del terreno por más tiempo en comparación con el surcado tradicional que no toma en cuenta este principio, se muestreó suelo para determinar el contenido de humedad, tanto en la parte baja (valle) como en la parte alta (lomo o cresta) del terreno. Los muestreos se realizaron a una profundidad de 0 a 20 cm en todos los casos. En la parcela 2, para tener datos de comparación, se dejó una parte de la misma en la que no se surcó acorde al diseño hidrológico del terreno. En la parcela 1 si se realizó el trazo en toda la parcela, aquí lo que se buscó probar fue que la humedad en las partes altas del predio no fuera marcadamente menor que la humedad en la parte baja, lo que sería en el caso de hacer el surcado como el productor lo hacía de manera tradicional, es decir, sin tomar en cuenta la pendiente del terreno.

Para el monitoreo de la humedad de suelo se utilizó equipo del tipo TDR, con varillas de 30 cm y 10 cm de profundidad. Adicionalmente y como medida de seguridad se tomaron muestras de suelo en frascos de vidrio y el material fue pesado húmedo, luego secado en la estufa de laboratorio y vuelto a pesar para obtener el contenido de humedad en la muestra. Cabe aclarar que debido a la escasa profundidad del terreno, las varillas de los equipos TDR (tanto las de 30 cm como las de 10 cm) se insertaron de manera inclinada (0-20 cm). No obstante, este sistema de monitoreo no pudo ser constante debido a que cuando el suelo estaba seco fue prácticamente imposible insertar las varillas, tanto las de 10 como las de 30 cm. Además del estado seco del suelo, esto se vio influenciado por el alto contenido de piedras en el terreno. De esta forma, el monitoreo fue realizado con las muestras de suelo tomadas en frasco y por el método gravimétrico; es decir, pesar el suelo húmedo y luego pesarlo seco y obtener así el contenido de humedad.

Las imágenes siguientes muestran el equipo empleado, aunque como se ha dicho el método consistente fue el método gravimétrico, por las razones antes expuestas.



Fotografía 12. Equipo TDR en campo midiendo humedad del suelo.



Fotografía 13. Monitoreo de humedad del suelo con equipo TDR.



Fotografía 14. Muestreo de suelo para medir contenido de humedad.



Fotografía 15. Secado de muestras de suelo en estufa.



Fotografía 16. Pesaje de suelo para determinar contenido de humedad.



Fotografía 17. Surcado en Línea Clave después de una lluvia.

Se ha mencionado que la característica del sistema es que permite una mejor gestión de la humedad en el suelo al facilitar el flujo del agua, de manera sub-superficial de las partes bajas hacia las partes más elevadas del terreno.

Para evidenciar lo anterior el monitoreo de la humedad del suelo consideró puntos ubicados tanto en las áreas bajas o depresiones del terreno, como en las áreas planas o más altas. En las figuras siguientes se marcan en el predio las áreas de depresión o valles. Posteriormente vuelven a presentarse los mismos planos, pero ahora señalando los sitios donde se realizaron las mediciones de humedad del suelo para monitorear esta variable durante el período de desarrollo del cultivo de sorgo establecido.

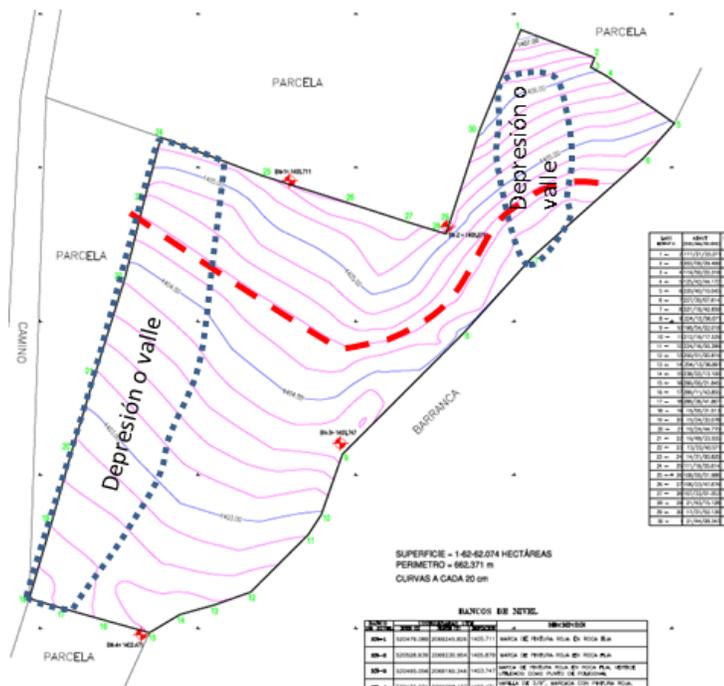


Figura 16. Áreas de depresión en la Parcela 1. Amayuca, Mor.

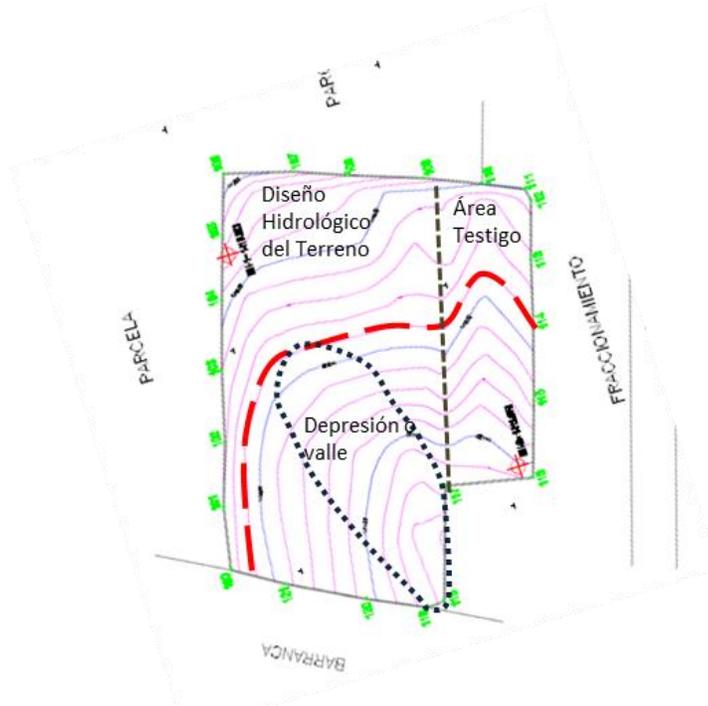


Figura 17. Áreas de depresión en la Parcela 2. Amayuca, Mor.

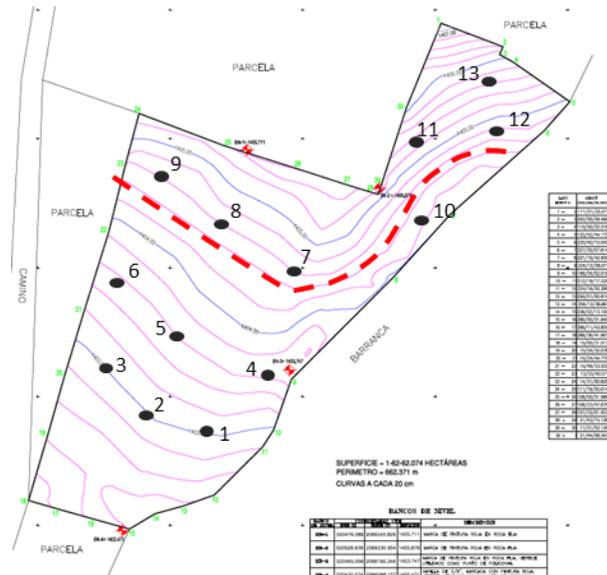


Figura 18. Sitios de muestreo en la Parcela 1. Amayuca, Mor.

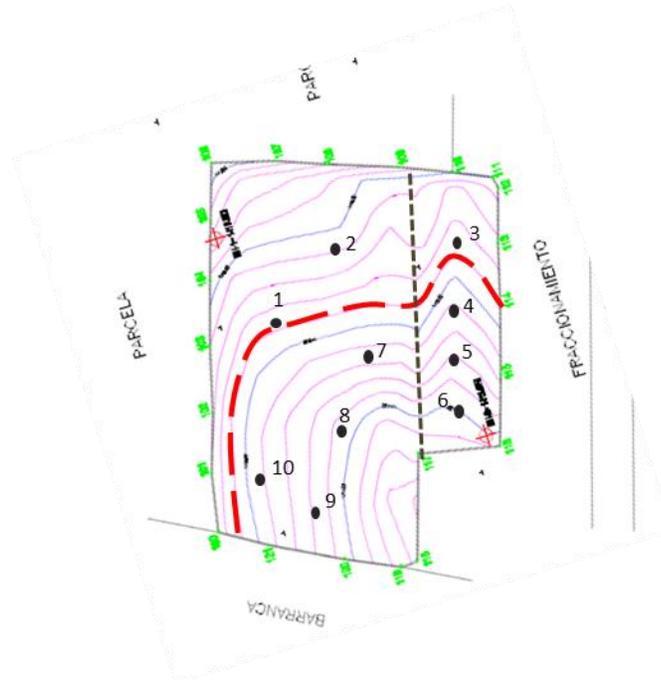


Figura 19. Sitios de muestreo en la Parcela 2. Amayuca, Mor.

Cuadro 1. Coordenadas de los sitios de muestreo, Amayuca, Morelos, 2013.

	PARCELA 1.			PARCELA 2.	
Punto	Lat Norte	Long Oeste	Punto	Lat Norte	Long Oeste
1	18° 42' 48.3"	98° 48' 21.4"	1	18° 43' 04.6"	98° 48' 10.0"
2	18° 42' 48.7"	98° 48' 22.0"	2	18° 43' 04.3"	98° 48' 09.7"
3	18° 42' 49.0"	98° 48' 22.6"	3	18° 43' 03.5"	98° 48' 09.8"
4	18° 42' 49.5"	98° 48' 20.8"	4	18° 43' 03.6"	98° 48' 10.1"
5	18° 42' 49.8"	98° 48' 21.8"	5	18° 43' 03.7"	98° 48' 10.5"
6	18° 42' 50.3"	98° 48' 22.3"	6	18° 43' 03.8"	98° 48' 10.8"
7	18° 42' 50.7"	98° 48' 20.0"	7	18° 43' 04.1"	98° 48' 10.3"
8	18° 42' 50.9"	98° 48' 21.0"	8	18° 43' 03.3"	98° 48' 10.7"
9	18° 42' 51.6"	98° 48' 21.9"	9	18° 43' 04.7"	98° 48' 11.1"
10	18° 42' 50.9"	98° 48' 18.6"	10	18° 43' 05.1"	98° 48' 10.9"
11	18° 42' 52.1"	98° 48' 18.6"			
12	18° 42' 52.4"	98° 48' 17.4"			
13	18° 42' 53.0"	98° 48' 17.8"			

Los resultados obtenidos en la medición de los contenidos de humedad en el suelo a través del tiempo se muestran en los Cuadros del 2 al 5 en las páginas siguientes.

Cuadro 2. Contenido de humedad (%) en el suelo en Parcela 1. Amayuca.

Fecha	SITIOS EN LA PARCELA												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
180613	21.0	18.1	17.5	16.3	15.9	15.4	16.9	14.7	13.7	14.8	13.5	16.4	17.1
50713	17.7	17.7	16.2	15.7	15.4	13.7	15.5	14.5	13.8	17.0	18.1	15.3	15.2
190713	10.5	9.7	9.0	9.5	8.7	7.9	9.3	8.0	7.5	10.7	11.2	10.3	9.9
300713	10.7	9.2	8.7	10.2	9.4	8.8	9.7	7.8	7.2	8.5	7.9	11.5	10.3
80813	9.3	6.9	7.7	8.6	7.7	7.8	6.9	6.4	6.4	5.2	4.2	6.4	6.8
200813	9.5	7.7	6.3	8.8	5.7	6.5	10.2	8.8	8.3	8.4	9.6	11.8	9.7
20913	15.4	14.3	11.9	14.3	11.7	11.2	13.2	12.5	12.8	9.5	8.7	13.2	9.9
41013	17.2	15.4	11.9	16.6	13.6	12.9	19.0	15.8	13.7	12.8	11.7	21.4	15.9
221013	19.1	18.2	16.1	21.1	17.8	15.7	2.0	15.4	15.5	14.1	12.6	14.8	15.2
171113	16.0	12.5	12.1	14.9	12.9	14.0	10.8	9.5	8.0	9.9	11.9	14.0	15.8
151213	11.3	10.5	7.0	9.7	5.3	3.6	9.6	8.1	4.5	9.1	6.6	11.1	16.0

Cuadro 3. Contenido de humedad (%) en el suelo en Parcela 2. Amayuca.

Fecha	SITIOS EN LA PARCELA									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
180613	16.6	15.7	13.7	12.8	11.9	12.8	16.2	14.0	19.4	18.7
50713	18.2	19.5	15.2	14.9	16.1	14.3	20.3	16.6	21.0	23.7
190713	9.9	10.7	11.4	9.2	10.0	7.5	13.0	8.7	14.1	11.2
300713	8.5	9.2	8.0	7.4	7.9	8.1	9.4	8.0	12.1	12.3
80813	4.4	6.7	4.1	4.3	4.4	4.7	8.0	4.3	8.1	8.8
200813	8.5	10.9	9.1	7.0	8.2	5.7	8.8	7.8	13.4	10.6
20913	7.4	9.6	7.6	5.7	5.3	4.9	10.2	9.2	11.1	11.7
41013	14.0	14.4	10.7	12.3	9.8	9.0	16.0	12.6	18.0	16.4
221013	13.7	16.0	14.3	13.8	14.0	12.9	15.9	15.1	16.4	16.7
171113	11.1	11.9	10.9	10.0	8.0	7.9	13.4	11.2	18.9	13.9
151213	6.0	7.4	5.0	4.2	3.2	2.7	7.8	6.3	10.9	9.3

En los Cuadros 2 y 3 antes presentados aparece en la primera columna la fecha de muestreo. Puede verse que se tuvieron once muestreos a lo largo del período del estudio. Puede asimismo observarse que en la parcela de mayor tamaño (Parcela 1) se localizaron 13 puntos de muestreo, en tanto que en la parcela de menor superficie el muestreo se realizó únicamente en diez sitios. Los cuadros muestran los valores puntuales observados por sitio y por fecha. Para hacer el análisis de los datos se realizó una agrupación de los datos, de tal forma que se obtuvo el

promedio de los puntos ubicados en las depresiones del terreno (aquí llamados valles o partes bajas) y el promedio de los valores de los puntos localizados en las partes altas y más planas del terreno, aquí denominadas crestas o lomos. Para la Parcela 1, los puntos en los valles son los sitios 3, 6, 9, 10 y 11. En lo que corresponde a la Parcela 2, los puntos en el valle son los números 1 y 8, en tanto que los sitios 3, 4, 5 y 6 se ubican en lo que se denominó área testigo, dado que ahí se surcó el terreno de manera tradicional, es decir en el sentido de la pendiente. Los resultados se presentan en los cuadros subsiguientes.

Cuadro 4. Valores promedio por fecha para parcelas 1 y 2. Amayuca, Morelos.

Parcela 1	Promedio	Promedio	Parcela 2	Promedio	Promedio	Promedio
Fecha	valles	crestas	Fecha	valles	crestas	Testigo
18/06/13	15.0	17.1	18/06/13	15.3	17.5	12.8
05/07/13	15.8	15.9	05/07/13	17.4	21.1	15.1
19/07/13	9.3	9.5	19/07/13	9.3	12.3	9.5
30/07/13	8.2	9.9	30/07/13	8.3	10.8	7.9
08/08/13	6.3	7.4	08/08/13	4.4	7.9	4.4
20/08/13	7.8	9.0	20/08/13	8.2	10.9	7.5
02/09/13	10.8	13.1	02/09/13	8.3	10.7	5.9
04/10/13	12.6	16.9	04/10/13	13.3	16.2	10.5
22/10/13	14.8	15.4	22/10/13	14.4	16.3	13.8
17/11/13	11.2	13.3	17/11/13	11.2	14.5	9.2
15/12/13	6.2	10.2	15/12/13	6.2	8.9	3.8

Los resultados muestran claramente que existe la tendencia, que se mantiene en el tiempo de muestreo, de que la humedad es mayor en la cresta o parte alta del terreno que en las depresiones o valles del mismo. Este comportamiento es contrario a lo normalmente encontrado en los terrenos agrícolas que no siguen el trazo de Línea Clave, por lo que se deduce que esto es debido a la influencia del trazo mencionado.

Para una mejor visualización de los resultados, se presentan los mismos en forma gráfica. Puede verse como el contenido de humedad tiene un descenso entre los meses de julio y agosto alcanzando valores máximos en octubre y vuelve a descender a finales de año. Esto es reflejo de la precipitación en la zona que este año tuvo un valor de 942 milímetros.

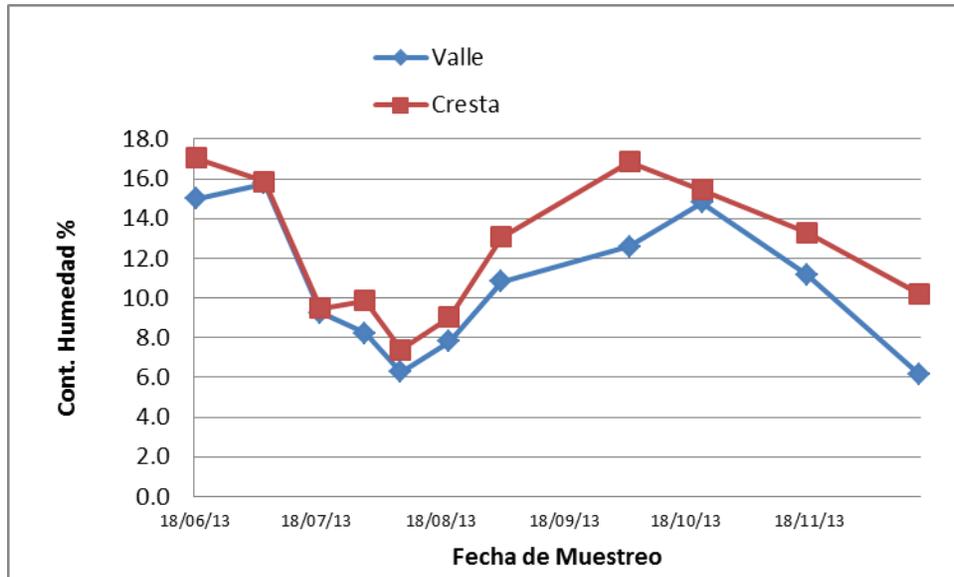


Figura 20. Humedad en el suelo en la Parcela 1. Amayuca, Mor.

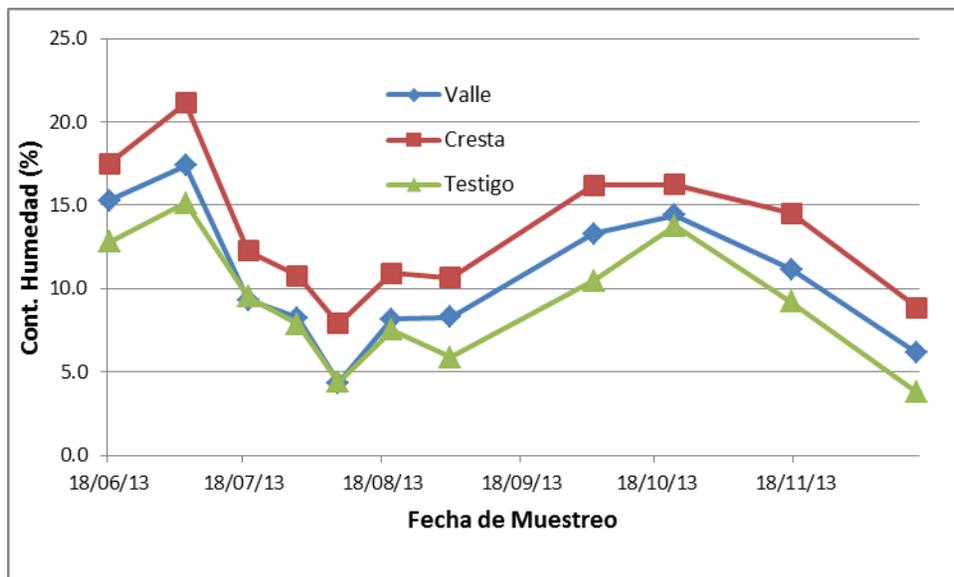


Figura 21. Humedad en el suelo en la Parcela 2. Amayuca, Mor.

En el caso de la parcela dos, donde se dejó una pequeña área a manera de testigo, puede observarse que de hecho muestra contenidos de humedad muy bajos en relación con los datos arrojados por la parte del predio en que se realizó el surcado con el método del diseño hidrológico del terreno, basado en la Línea Clave. En la parte del terreno surcada en forma tradicional, el productor hace los surcos en el sentido de la pendiente, lo que acelera la salida del agua del predio.

Una corroboración del efecto del contenido de humedad del suelo en el terreno se manifiesta en el rendimiento obtenido en la parcela de trabajo. En parcelas aledañas al sitio de trabajo, el mismo productor, empleando la misma semilla y manejo del cultivo, siendo la excepción solo el surcado del terreno, obtuvo un rendimiento de 5,800 kg/ha, en tanto que en la parcela con el diseño hidrológico del terreno el rendimiento fue de 6,590 kg/ha, lo que indica un aumento del 13%, sin hacer alguna erogación extra.

6. INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA MEDICIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS

Aunque los resultados hasta ahora presentados muestran de manera evidente las bondades del método planteado, en cuanto a captar y retener más agua de lluvia en el terreno, almacenando ésta en el suelo mismo, con los consecuentes beneficios para el desarrollo de los cultivos, cumpliendo así con los objetivos del proyecto, es también cierto que la información generada pudiera enriquecerse si se dispusiera de un dispositivo de medición de lluvia y escurrimiento en el predio. Con el propósito de que en futuros trabajos esta medición sea posible, se construyó, para medir la lluvia, un prototipo de pluviógrafo digital, basado en un medidor ultrasónico de nivel y considerando el principio de almacenamiento y sifonamiento de un volumen de agua. Para la medición del escurrimiento superficial (hacia fuera de la parcela) se construyó una estructura móvil del tipo de aforador de garganta larga, basado en un medidor ultrasónico de caudal. Estos equipos fueron construidos, probados e instalados en campo. Debe decirse que el equipo fue construido e instalado prácticamente a finales de la temporada de lluvias, por lo cual no fue posible captar información correspondiente al presente ciclo lluvioso. No obstante, el equipo está totalmente listo para ser usado en trabajos posteriores de la Subcoordinación de Conservación de Cuencas y Tecnología Forestal, pues su utilidad no es solo en lo relacionado con el diseño hidrológico del terreno, sino en todo lo relativo al proceso lluvia-escurrimiento-erosión, tema de fundamental importancia para la conservación de suelo y agua y el manejo integral de cuencas, tópicos de particular interés para la Subcoordinación.

A continuación se presentan los principios teóricos básicos para el diseño de los dispositivos antes mencionados y se describe de manera resumida la construcción de los mismos.

6.1. Caudalímetro Ultrasónico

Esta sección inicia indicando los aspectos metodológicos para integrar una tecnología para instrumentar la medición continua del caudal. En primer lugar se presenta la estructura de base y en seguida la instrumentación.

Es importante poder medir con exactitud el caudal en canales abiertos por propósitos diversos. En la agricultura bajo riego, debe controlarse el gasto en las derivaciones y en las tomas del canal de modo que el agua disponible pueda suministrarse a las zonas que verdaderamente la necesitan y evitar su distribución incorrecta. En casos como el presente estudio, se desea conocer el volumen

de agua que sale de la parcela en forma de escurrimiento superficial, como consecuencia de los eventos de lluvia que ocurren durante el ciclo del cultivo. Para hacer la medición del caudal entonces, es necesaria la instalación de estructuras llamadas de aforo. En general, la mayoría de las obras de medición o de regulación de caudales constan de un tramo convergente, en donde el agua, que llega en régimen subcrítico, se acelera y conduce hacia una contracción o garganta, en la que alcanza una velocidad supercrítica, a partir de la cual esta velocidad se va reduciendo gradualmente, hasta llegar, de nuevo, a un régimen subcrítico, en el que se recupera la energía potencial.

Aguas arriba de la obra existe un canal de aproximación, que es necesario para que se produzca un régimen determinado, de modo que la superficie del agua se mantenga estable y poder medir su altura con exactitud. En estas estructuras, aguas abajo del medidor hay un canal de cola, que es de capital importancia para el diseño de la obra, debido a que la gama de niveles de agua en el mismo, que resultan de variar los caudales, será la que determine la altura del resalto en el estrangulamiento, con respecto a la cota de la solera de éste canal de cola.

Algunas obras de medición comúnmente aceptadas eliminan o prescinden de uno o más de estos elementos y, en consecuencia, la función de la parte suprimida no se realiza, quedando reducidas por ello sus posibilidades de aplicación. De todos los elementos, el más importante es el estrangulamiento o garganta, de cierta longitud, en donde el caudal entra sin derivación alguna y hace posible aplicar los conocimientos teóricos de hidráulica, de manera que sea posible predecir con exactitud el comportamiento hidráulico de las obras con diferentes formas que puedan utilizarse.

Esta predicción teórica es importante no solo es para diseñar obras que cumplen ciertas condiciones específicas sino también para determinar la aceptabilidad de los errores de construcción y las modificaciones en su ejecución. Las gargantas muy cortas (o inexistentes) producen flujos tridimensionales, para los que no se conoce ninguna teoría, y esto limita la posibilidad de predecir su comportamiento hidráulico.

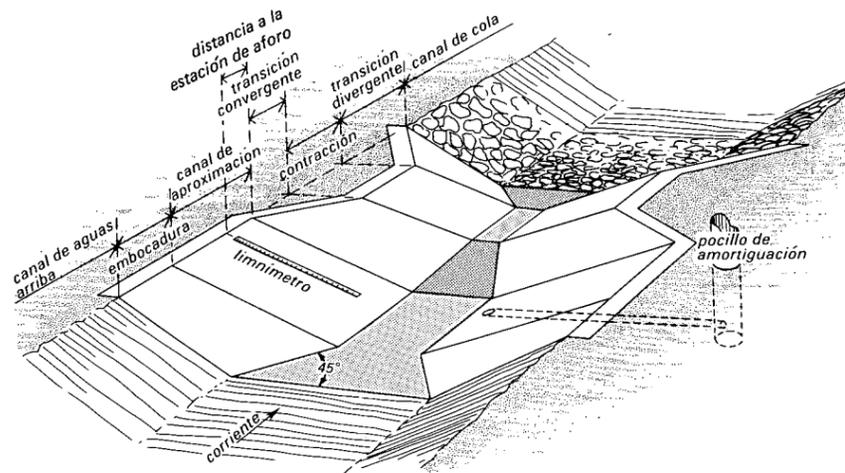


Figura 22. Disposición general de una obra para medición de caudales.

La diferencia de alturas entre la cresta del resalto en la contracción y el nivel del agua en el canal de aproximación se denomina 'altura de carga, aguas arriba, referida al resalto'. La parte del canal de aproximación en la que se mide la altura de la lámina de agua se llama 'sección de medida de la altura de carga' o 'estación de aforo'.

El término 'vertedero' se utiliza cuando la sección de control se forma esencialmente elevando el fondo del canal, y se denomina 'aforador' cuando se realiza un estrechamiento lateral del canal. También se denomina, normalmente, aforador cuando la sección de control se forma elevando el fondo y estrechando las paredes a un tiempo. No obstante, existe una porción de obras y dispositivos de medida que pueden denominarse, indistintamente, vertederos o aforadores.

Dentro de las obras semejantes a las descritas se clasifican aquellos vertederos o aforadores en los que, a su paso por la garganta, y en la denominada sección de control, las líneas de corriente van paralelas (o casi paralelas), al menos en una corta distancia. Para lograr este régimen, la longitud, L , de la coronación del vertedero o de la garganta del aforador, en la dirección de la corriente, está limitada por la energía de la carga aguas arriba, referida al resalto, H_1 .

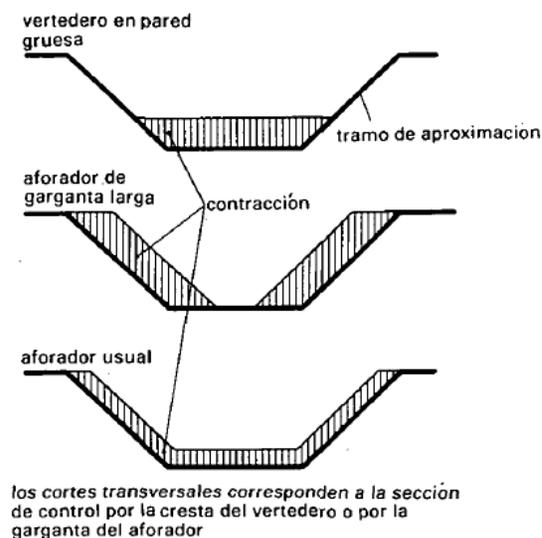


Figura 23. Diferencia entre vertedor y aforador

Se aconseja el uso de este tipo de medidores para aforar o para regular las corrientes de agua en canales abiertos, siempre que la superficie del agua en la sección de control pueda permanecer libre. Este tipo de obras posee las siguientes principales ventajas sobre cualquier otra clase de vertedor o aforador conocida (Parshall, aforador sin contracción, aforador H, vertedor de pared delgada, etc.):

- Siempre que el régimen crítico se produzca en la garganta, será posible calcular unas tablas de caudales, con error menor del 2%, para cualquier combinación de contracción prismática, con cualquier forma de canal de aproximación.
- La sección de la garganta, normal a la dirección de la corriente, puede conformarse de manera que sea capaz de medir con exactitud cualquier caudal, dentro de la gama prevista.
- La pérdida de carga en el vertedor o aforador, necesaria para que exista una relación única entre la carga de aguas arriba referida a la cresta del aforador y el caudal, es la mínima.

- d. Esta necesidad de pérdida de carga puede estimarse con suficiente precisión para cualquiera de estas obras, instalada en cualquier canal.
- e. Los cuerpos flotantes transportados por la corriente causan pocos problemas en este tipo de obras, debido a su tramo de convergencia progresiva.
- f. Las observaciones de campo han demostrado que la obra puede diseñarse para dejar pasar los sedimentos transportados en canales con régimen subcrítico.
- g. Siempre que la garganta sea horizontal en la dirección de la corriente se puede confeccionar una tabla de valores que se base en las dimensiones de la obra terminada. Esto permite disponer de un cuadro de valores exactos, que compensen las variaciones producidas con respecto a las cotas del diseño y, en caso necesario, posibilite la remodelación de la contracción.
- h. En condiciones hidráulicas y de entornos similares, estos vertedores y aforadores son, en general, las obras más económicas para la medición exacta de caudales. Para que una obra destinada a medir o a regular el caudal de un canal de riego funcione bien, habrá de ser convenientemente elegida. Deberán relacionarse todas las condiciones que haya de cumplir y cubrirlas con las características de los medidores conocidos.

En general, estas exigencias provienen de cuatro fuentes:

1. De las características hidráulicas.
2. De los costos de construcción y/o de instalación.
3. De la facilidad de manejo del medidor.
4. De los gastos de mantenimiento.

6.1.1. Funciones de la obra

6.1.1.1. Medición de caudales

Todos los vertedores y aforadores son ejemplos de instalaciones para medir el caudal. Para determinar el tipo específico de obra a adoptar, si es que hay alguno, debemos primero, conocer durante qué período y con qué frecuencia deben realizarse las mediciones. Esto, unido a la información sobre el tamaño y tipo del canal en el que han de medirse los caudales, nos llevará a utilizar:

1. El método de área-velocidad.
2. Un dispositivo portátil y reutilizable.
3. Una obra de uso temporal hecha a la medida.
4. Una obra de uso permanente.

Los dispositivos para medir caudales no necesitan partes móviles. La altura de carga en el tramo de aguas arriba en relación con la cresta del aforador puede medirse con diversos instrumentos. Si se desea medir el volumen total, puede utilizarse un vertedor o un aforador, con un instrumento, que acumule los diferentes caudales, durante cualquier intervalo de tiempo.

6.1.1.2. Regulación de caudales

Las obras para la regulación de caudales son necesarias cuando el agua se toma de un embalse o cuando un canal de riego se ramifica en dos o más cauces. Los vertedores de regulación están dotados de partes móviles, y su lámina puede desplazarse verticalmente. Manteniendo un nivel casi constante aguas arriba, puede fijarse la altura de carga en relación con la medida del vertedor y, con este dato, conocer el caudal que pasa por él.

6.1.1.3. Pérdida de carga necesaria para régimen modular

La pérdida de carga disponible en el punto de medición y la pérdida de carga en el AGL influyen, tanto en la forma de la sección transversal de la sección de control, como en la relación de ensanchamiento del tramo de salida, aguas abajo de dicha sección.

La diferencia entre la carga de energía aguas arriba H_1 , y la carga de energía aguas abajo H_2 , ambas referidas a la misma medida de la cresta del aforador, se puede expresar por $\frac{H_1 - H_2}{H_1}$. Este cociente puede, también, escribirse como $1 - \frac{H_2}{H_1}$ en donde su último término expresa la relación de submergencia. Para valores bajos de la relación de submergencia $\frac{H_2}{H_1}$, el nivel de cola (H_2) no influye en la relación entre h_1 y Q y el régimen a través del dispositivo, o del módulo, se denomina modular. Para relaciones $\frac{H_2}{H_1}$, altas, el flujo en el estrangulamiento no puede alcanzar un régimen crítico, de modo que la altura de carga de aguas arriba referida a la cresta del aforador queda influida por el nivel del agua de cola y, en consecuencia, el régimen no es modular. Para la que el régimen modular pase a ser no modular se denomina límite modular. Si las velocidades del agua en los canales de aproximación y de cola son pequeñas, las cargas debidas a la velocidad, a $\frac{v_1^2}{2g}$ y a $\frac{v_2^2}{2g}$ (Figuras 24 y 25), serán también pequeñas en relación con las alturas de carga, h_1 y h_2 . En este caso, el valor de la relación h_1 , se aproxima al de $\frac{h_2}{h_1}$. En el Cuadro 5 se exponen los valores de $\frac{v_2^2}{2g}$, en función de la velocidad media de la corriente v .

Donde:

h = altura de carga con respecto al nivel de la cresta del aforador.

g = aceleración de la gravedad

$$H = h + \frac{v^2}{2g}$$

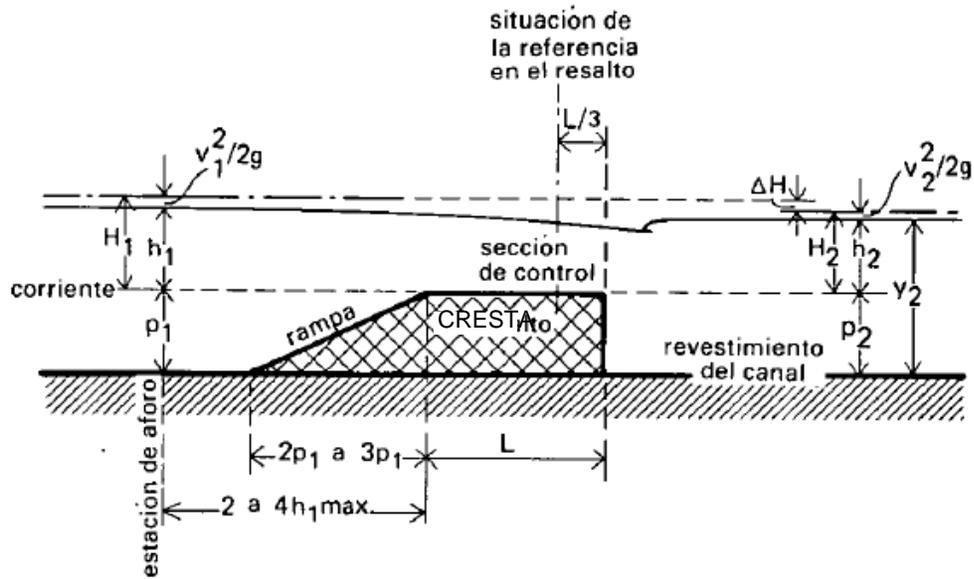


Figura 24. Denominación de los elementos y partes de un aforador (Lateral)

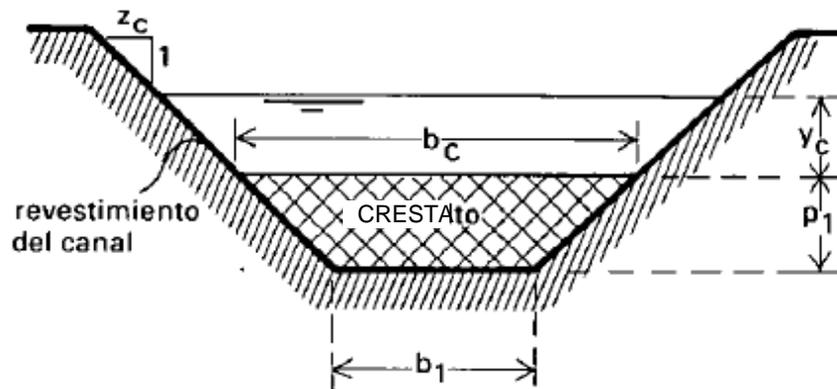


Figura 25. Denominación de los elementos y partes de un aforador (Frente)

Cuadro 5. Valores de $\frac{v^2}{2g}$ en función de v

v (m/s)	$V^2/2g$ (m)
0.10	0.0005
0.20	0.0020
0.30	0.0046
0.40	0.008
0.50	0.013
0.75	0.029
1.00	0.051
1.25	0.080
1.50	0.11

6.1.2. Sensibilidad de la obra de medición

La precisión con la que puede medirse un caudal circulante depende de:

1. La exactitud con la que pueda confeccionarse la tabla de valoración de los caudales para tal instalación.
2. La exactitud con la que pueda medirse la altura de carga de aguas arriba h_1 con respecto a la cresta del AGL.

El error del caudal, producido por una medición incorrecta del valor de la altura de carga h , aguas arriba de una obra dada, puede evaluarse por la sensibilidad S , del aforador que, para régimen modular (no sumergido), es:

$$S_o = \frac{100\Delta Q}{Q} = 100u \frac{\Delta h_1}{h_1} \%$$

en donde,

Δh = la diferencia entre el valor determinado de h , y su valor real.

Esta diferencia Δh puede deberse a un cambio inadvertido del nivel del agua, a una lectura equivocada de la altura de carga en la regleta limnimétrica o de la precisión del sensor de nivel, o un defecto de colocación, a una incorrecta puesta a cero de la escala, a resistencias internas del mecanismo registrador, etc. El valor total de Δh , aumenta rápidamente, si no se pone suficiente cuidado en la determinación de h_1 . En la Figura 26 se muestran, expresados en tanto por ciento, diversos valores de S , en función de $\frac{\Delta h_1}{h_1}$ y del valor de u , siendo este último un indicador de la forma de la sección de control.

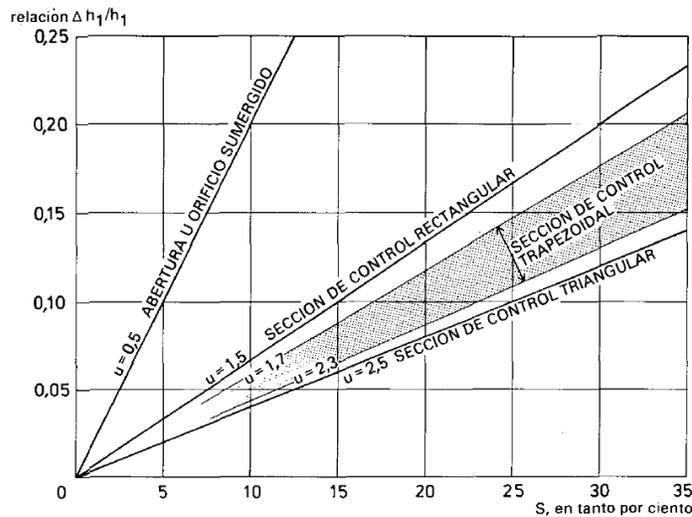


Figura 26. Sensibilidades en función de las variaciones relativas de la altura de carga y de la forma en la sección de control (regimen modular)

6.1.3. La medida de la altura de carga

Para poder medir un caudal con exactitud es necesario conocer la verdadera altura de la carga, aguas arriba del medidor, referida al nivel de la cresta del AGL. De hecho la importancia de la medida de la carga es tal que, con frecuencia, el éxito o el fracaso de una obra de medición dependen enteramente de la eficacia de la escala o del sensor de nivel.

El nivel de referencia se toma en la sección de control, que se encuentra, bien sobre la propia cresta del vertedor o bien a una distancia de, aproximadamente, $\frac{L}{3}$ del borde inferior de la cresta, en la garganta del aforador (Figura 27).

El plano superior del umbral (cresta del vertedor o solera de la garganta del aforador) debe ser perfectamente horizontal en la dirección de la corriente. En el caso de que este plano tenga pequeñas ondulaciones, se recomienda tomar, como verdadero nivel de referencia, el nivel medio de la sección de control, en lugar del nivel medio de toda la cara.

El sensor o escala para la medida de la altura de carga, deberá colocarse suficientemente distante, aguas arriba, de la obra de aforo, como para que caiga fuera de la zona de descenso de la superficie del agua, si bien lo bastante cerca de dicha obra como para que entre ambos sea despreciable la pérdida de energía. Esto supone que deberá situarse a una distancia del borde anterior de la cresta de entre dos y tres veces el valor de H_1 , o, como mínimo a una distancia igual a H_1 del comienzo de la contracción, tomándose la mayor de estas dos distancias.

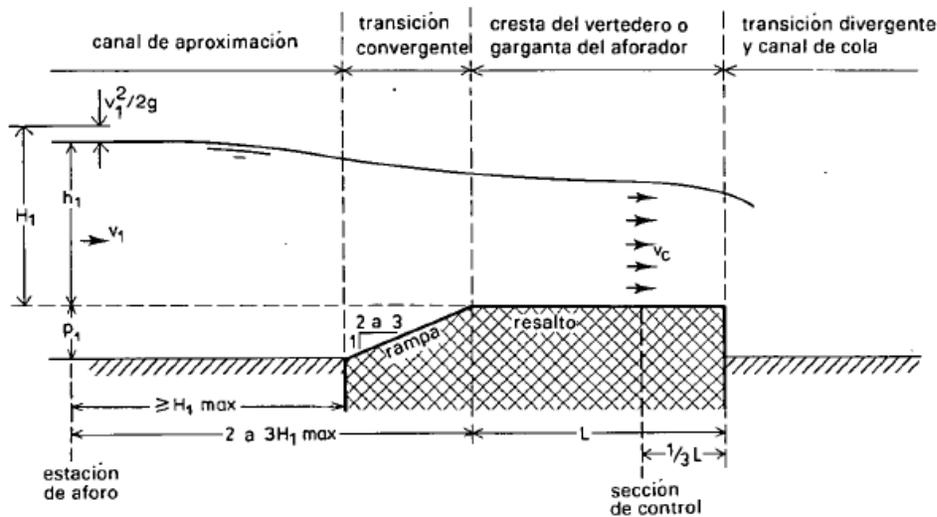


Figura 27. Terminología general en estructuras de aforo

El nivel del agua en la estación de aforo puede medirse con una escala graduada, vertical o inclinada. En general, para medidas esporádicas, basta con una sonda de punzón o un limnómetro, pero cuando se precisa una evaluación continua es necesario disponer de un limnógrafo de registro automático o un sensor con memoria de registro. Con independencia del tipo de dispositivo que se utilice para medir la altura de carga, debe instalarse éste siempre a un lado del canal de aproximación, con el fin de que no interfiera en la manera de acercarse la corriente al aforador.

6.1.4. Leyes Carg – Gasto

Cuando se necesita una información continua del caudal, o en canales en los que las fluctuaciones de nivel se producen de una forma gradual, pueden obtenerse datos suficientes efectuando lecturas periódicas sobre una escala graduada, la cual deberá estar situada de tal manera que sea posible leer el nivel del agua desde la propia banqueta del canal y que el observador pueda limpiar con facilidad su superficie, o bien instalar un sensor de nivel sobre el canal a reserva de tener estable la superficie libre del agua. Para canales de tierra por ejemplo el limnómetro puede montarse verticalmente sobre un soporte que se coloca en el mismo cauce. Este soporte debe ser de tal forma que no interfiera en el curso del agua que pasa a través del aforador y que tampoco retenga cuerpos flotantes.

En los canales revestidos de hormigón, los limnómetros pueden montarse directamente adosados a sus cajeros. Cuando las paredes del canal están inclinadas, la longitud indicada sobre la escala es mayor que la correspondiente profundidad vertical del agua. Dentro de un sistema de riego es de desear que la elección de la obra de medición se haga entre los modelos normalizados existentes. También conviene marcar las escalas limnimétricas de los aforadores en litros/segundo, metros cúbicos/segundo o pies cúbicos/segundo, o en cualquier otra unidad practica de caudal, mejor que en alturas de carga. Así, una vez que se ha montado y comprobado la escala, se evita la posibilidad de que, en alguna ocasión, puedan utilizarse unas tablas de caudales equivocadas. Estos limnómetros o sensores de lectura directa pueden emplearse también en los vertedores móviles.

6.1.5. Cálculo del gasto a partir de la medición de nivel

Una de las estructuras de medición que mejor cumple con las características anteriores es el Aforador de Garganta Larga (AGL). Este es en esencia una estructura que mediante sus características geométricas produce la reducción de la sección transversal de flujo para generar la existencia de flujo crítico sobre la estructura misma.

En este tipo de estructuras (AGL) es necesario estar monitoreando el tirante de operación, esto se refiere al tirante máximo que se presenta aguas arriba (sobre el canal) de la estructura de control, para lo cual el tirante está relacionado a un gasto máximo que pasa sobre la estructura.

Con ayuda del software winflume, se obtiene una ecuación que de acuerdo con datos de la geometría del canal y del AGL se obtiene una ecuación para poder determinar el gasto, por ejemplo que solo aplica para ese canal y ese AGL.

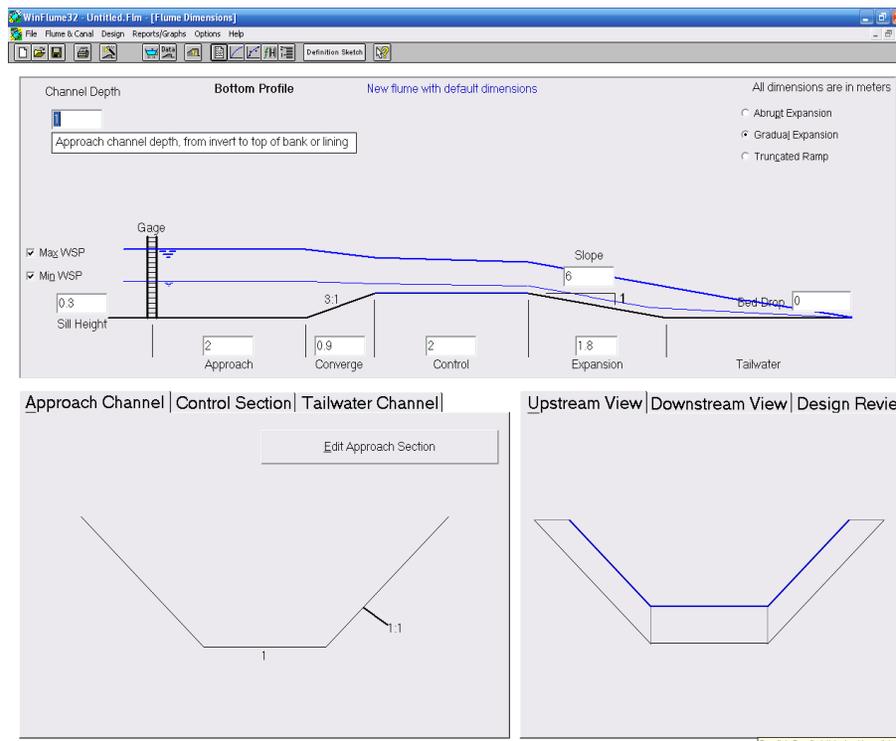


Figura 28. Pantalla principal del Winflume

Los datos necesarios para obtener una ecuación de gasto son los que se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 6. Datos para obtener la ecuación de gasto

Geometría Del Canal (m)	
B1= 1.000	B2= 1.000
Z1=1.500	Z2= 1.500
ΔP disp= 0.000	

Geometría Del Aforador (m)		
BC= 2.998	ZC= 1.500	P1= 0.666
AL= 0.0400	BL= 1.890	P2=* 0.666
DL= 3.996	TL= 0.700	EM=* 6.000
Rugosidad= 0.0200		EN= * 2.838

Nomenclatura		
BC = Ancho de Base Garganta	B2 = Ancho de Base Salida	DL = Long. de Rampa Salida
ZC = Talud Garganta	Z2 = Talud Salida	TL = Long. Sección de Control
B1 = Ancho de Base Entrada	AL = Long. Escala-Rampa Entrada	P1 = Long. Cresta Aguas Arriba
Z1 = Talud Entrada	BL = Long. de Rampa Entrada	P2 = Long. Cresta Aguas Abajo
	EN = Pendiente Entrada	EM = Pendiente Salida

Todos estos datos son introducidos dentro del winflume, junto con el coeficiente de rugosidad de Manning y la variación de caudales a medir, para obtener una ecuación de gasto del tipo potencial.

Ecuación 1.1

$$Q = \alpha h^{\beta}$$

Donde α y β son constantes calculadas por el programa que dependen de la geometría del canal y del aforador y h es el tirante de operación del (referido a la cresta del) AGL, este el dato que se necesita estar monitoreando, y es para el cual se construyó este sistema.

Lo anteriormente desarrollado expone el método de cómo obtener la ecuación de gasto y los datos necesarios requeridos a tal fin. En lo sucesivo se analizan los diseños de la geometría anterior y la construida.

6.1.5.1. Análisis del diseño de aforador

Debido a que lo anterior se pone como aspecto metodológico, el diseño “metodológico” mostrado en la figura 1.4.7 se revisa para poner de manifiesto su utilidad práctica.

En primer lugar se debe observar que el caudal máximo esperado en las tres microcuencas parcelarias es del orden de 90 lps para una superficie aproximada de una hectárea.

No obstante, para poder proporcionar una herramienta que sea útil al tipo de trabajo realizado, es decir una herramienta que cumpla con la determinación del caudal en tiempo real y que sea móvil,

como los términos de referencia lo indican, se aumentará el caudal máximo por lo menos para ampliar la medición de mayores caudales, y así ampliar el rango de la superficie de parcelas a medirles el escurrimiento.

El caudal de escurrimiento

Como fue mencionado en la sección c.f. 1.3.1 el gasto máximo esperado para cada una de las microcuencas en la parcela agrícola de interés son:

Microcuenca 1 (Sup. 1.07 ha) $Q_{\max} = 89.88$ lps. Aproximadamente 90 lps

Microcuenca 2 (Sup. 0.23 ha) $Q_{\max} = 19.32$ lps. Aproximadamente 20 lps

Microcuenca 3 (Sup. 0.25 ha) $Q_{\max} = 21.00$ lps. Aproximadamente 21 lps

Como se menciona con un caudal máximo superior de 140 lps se diseña una estructura que cumpla con dicho requerimiento de caudal máximo. Primero se revisa el diseño “metodológico”.

6.1.5.2. Análisis del diseño metodológico

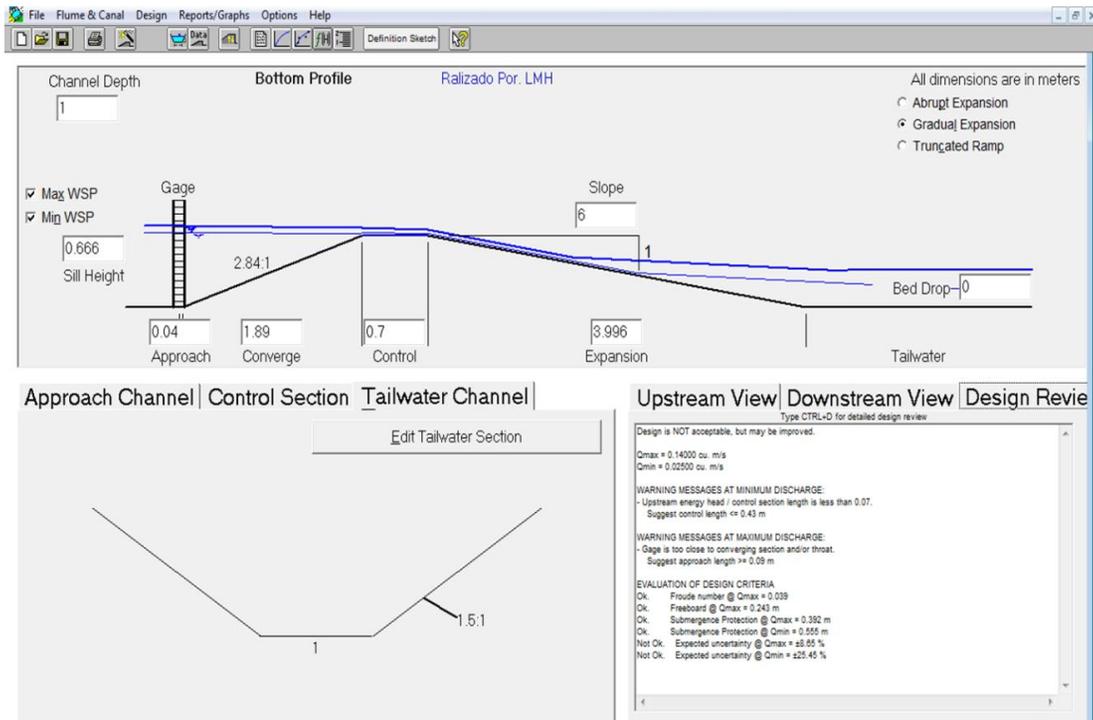
Con apoyo del sistema Winflume se reproducen los datos de la estructura aforadora (Figura 1.4.8), el Aforador de Garganta Larga (AGL) expuesto en la metodología. En Dicha figura se presenta la revisión del diseño.

Criterios de diseño. Se toman los datos de diseño, de gasto mínimo del orden de los 25 litros por segundo (lps) y un gasto máximo de 140 lps. Este gasto es evidentemente superior al reportado de requerimiento de medida por escurrimiento.

Además se toma un gradiente topográfico pequeño y un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025, esto debido a que el AGL con el uso presentará imperfecciones de geometría y rugosidad ya que la idea fundamental es que sea portátil para que se desplace en los puntos requeridos de medida de las microcuencas y otras parcelas.

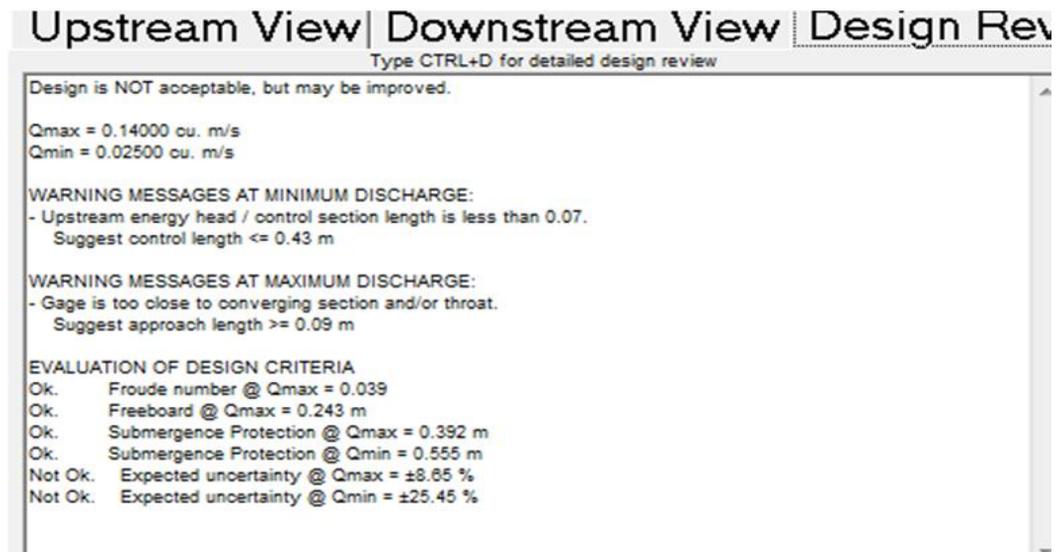
Aunado a lo anterior, un criterio de existencia de carga hidráulica posterior a la ubicación en campo del AGL es requerida, es decir la presencia hidráulica de una caída para que la estructura trabaje a descarga libre. Esto es correcto debido a que las salidas de la parcela caen a una depresión profunda conocida como barranca, de tal manera que es suficiente con ubicar el AGL en campo en dichas condiciones.

Revisión del diseño Se introducen dichos datos anteriores y la geometría requerida del Cuadro 6. Datos para obtener la ecuación de gasto.

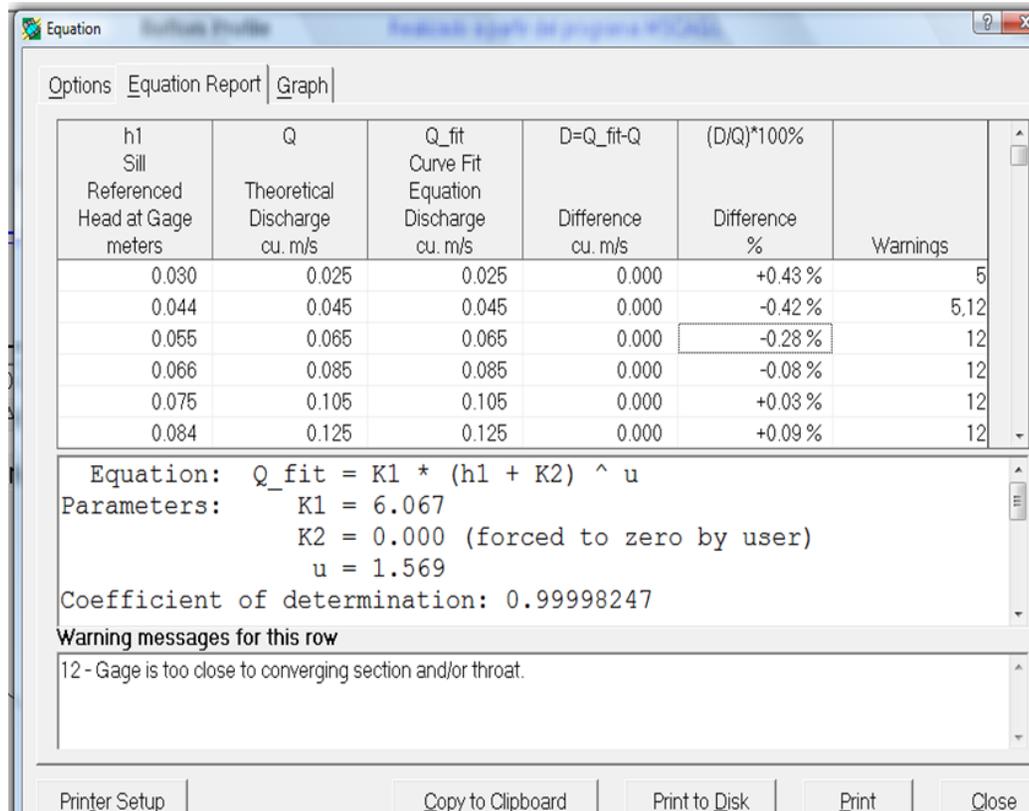


En primer lugar se detecta que no es necesaria una estructura tan grande para medir el caudal indicado. Lo cual le confiere a la misma una baja calidad de “estructura móvil”.

Por otro lado se determina que el diseño, aunque mide, no es aceptable y se puede mejorar.



Finalmente, de este diseño se observa que la ecuación de gasto tiene un coeficiente de proporcionalidad de 6.067 y un exponente de 1.569 con una indicación de error en las dimensiones de la garganta y la aproximación de la escala a la rampa de entrada.



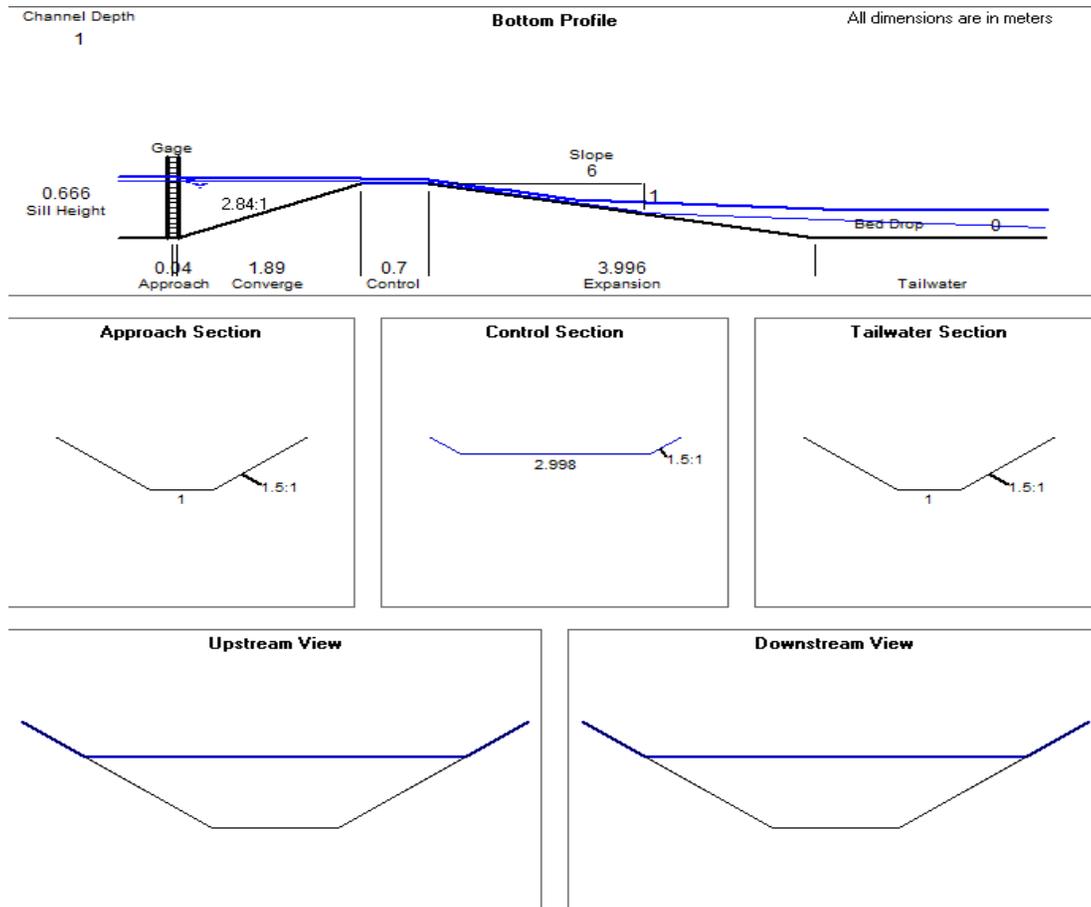
h1 Sill Referenced Head at Gage meters	Q Theoretical Discharge cu. m/s	Q_fit Curve Fit Equation Discharge cu. m/s	D=Q_fit-Q Difference cu. m/s	(D/Q)*100% Difference %	Warnings
0.030	0.025	0.025	0.000	+0.43 %	5
0.044	0.045	0.045	0.000	-0.42 %	5,12
0.055	0.065	0.065	0.000	-0.28 %	12
0.066	0.085	0.085	0.000	-0.08 %	12
0.075	0.105	0.105	0.000	+0.03 %	12
0.084	0.125	0.125	0.000	+0.09 %	12

Equation: $Q_{fit} = K1 * (h1 + K2) ^ u$
Parameters: $K1 = 6.067$
 $K2 = 0.000$ (forced to zero by user)
 $u = 1.569$
Coefficient of determination: 0.99998247

Warning messages for this row
12 - Gage is too close to converging section and/or throat.

De tal manera, como se observa, en la figura anterior, en el gasto generado y su respectiva carga, el flujo nulo y máximo ocurre en un tirante que oscila de cero a unos 10 centímetros. Esta gran estructura es entonces técnicamente no necesaria para satisfacer el objetivo de medir un caudal del orden de 100 lps.

El diseño “metodológico” cuyas dimensiones se encuentran en el Cuadro 6, fue entonces no construido, la figura siguiente expresa sus dimensiones.



Finalmente el diseño “metodológico” tiene:

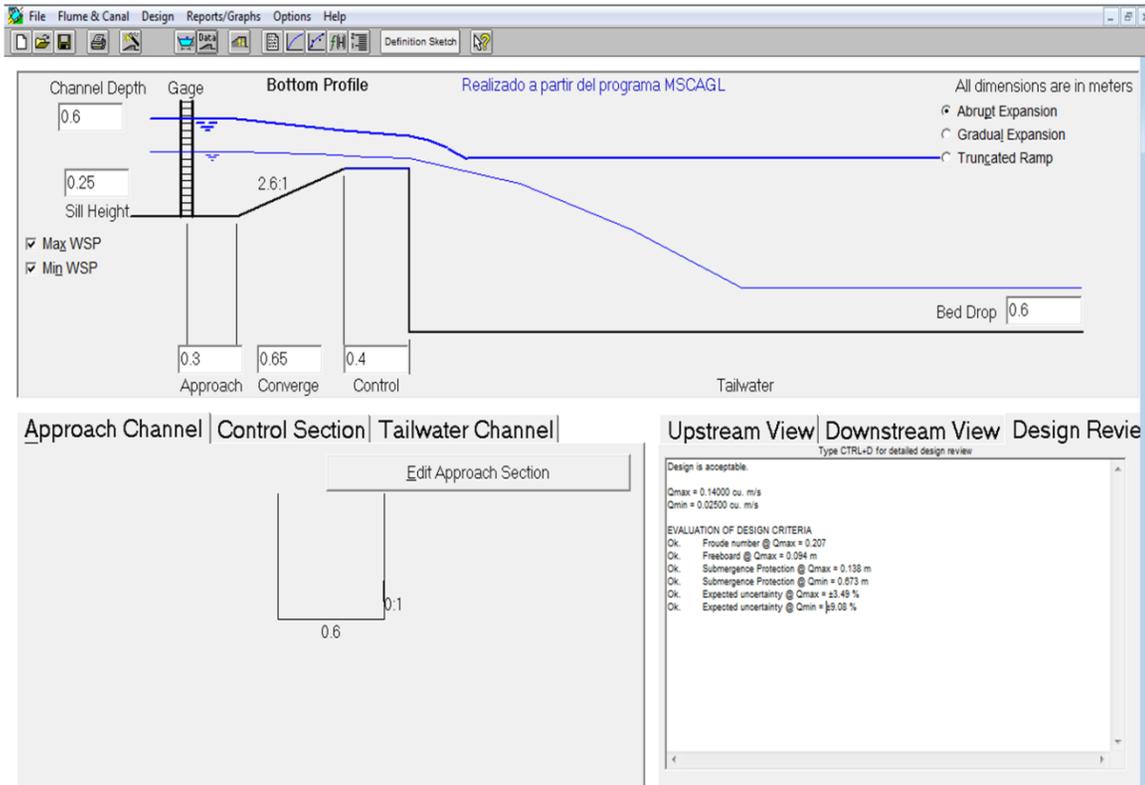
- 1) Un diseño mejorable del AGL
- 2) Un AGL de baja movilidad por ser de grandes dimensiones
- 3) Una precisión de caudal a gastos pequeños no deseable

Desde el punto de vista técnico, por esta razón el jefe de proyecto, no permitió la fabricación de este aforador de garganta larga.

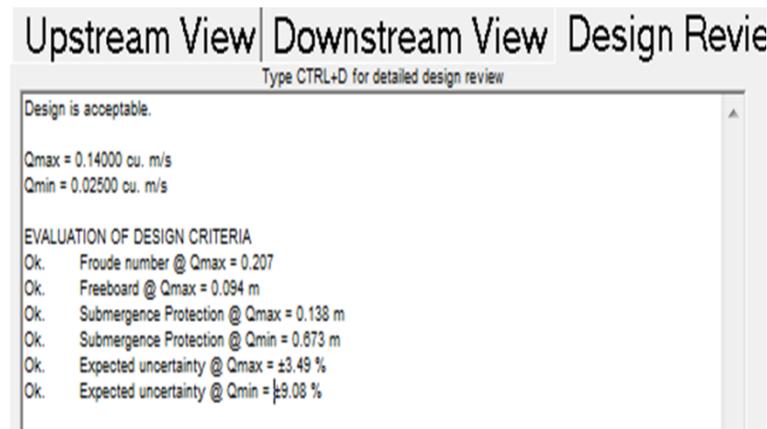
Por la misma razón, se propuso el siguiente diseño, base de la construcción del aforador de garganta larga que se entregó.

En primer lugar se modificó la sección del AGL para facilitar el proceso de instalación, al tratarse de una estructura móvil. Se hizo trapecial de talud nulo para que sea simplemente emparejado el suelo y protegido los taludes con un pequeño canal de llamada para direccionar la entrada del agua al aforador, tal y como se muestra en las imágenes de instalación de campo, ver fotografías en anexo.

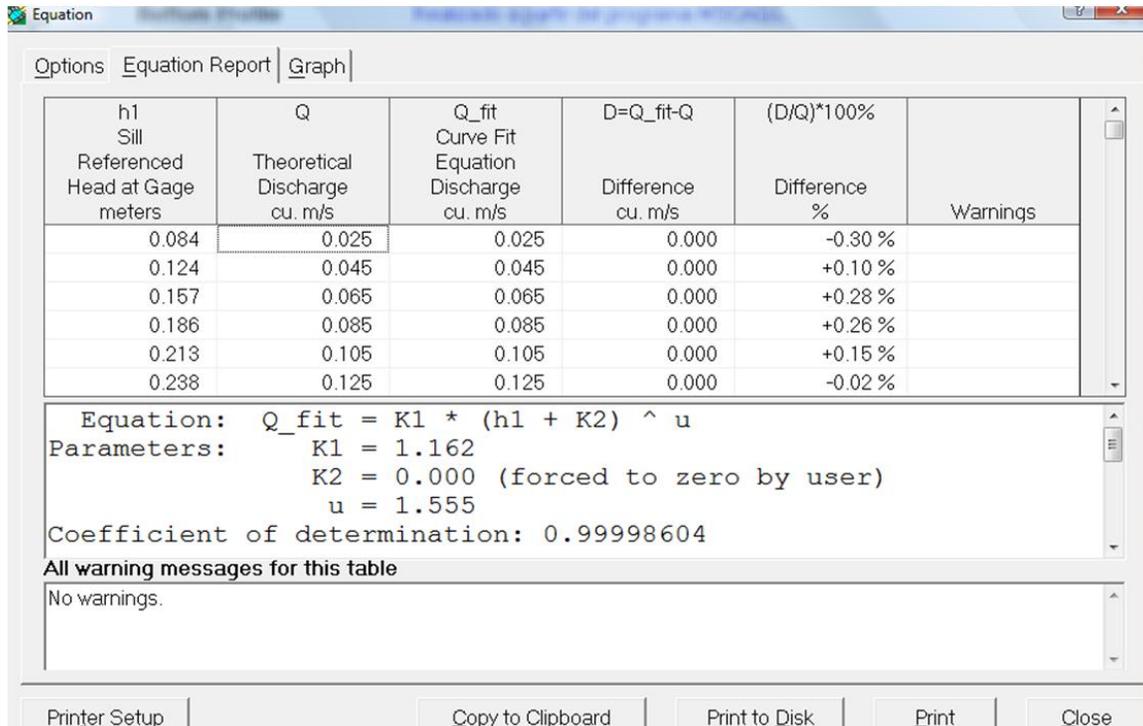
De este hecho resulta en una instalación estrictamente simple de realizar. Lo único que necesita el instalador es un nivel de mano para nivelar la estructura en su correcta posición y reforzar los bordos del canal de llamada.



Observe que el diseño precisa la presencia de la caída hidráulica en dirección aguas abajo, como fue mencionado anteriormente. Es decir el aforador debe trabajar a descarga libre.



De la figura anterior se deduce que el diseño es aceptable para el orden de caudales a medir.



h1 Sill Referenced Head at Gage meters	Q Theoretical Discharge cu. m/s	Q_fit Curve Fit Equation Discharge cu. m/s	D=Q_fit-Q Difference cu. m/s	(D/Q)*100% Difference %	Warnings
0.084	0.025	0.025	0.000	-0.30 %	
0.124	0.045	0.045	0.000	+0.10 %	
0.157	0.065	0.065	0.000	+0.28 %	
0.186	0.085	0.085	0.000	+0.26 %	
0.213	0.105	0.105	0.000	+0.15 %	
0.238	0.125	0.125	0.000	-0.02 %	

Equation: $Q_fit = K1 * (h1 + K2) ^ u$
Parameters: $K1 = 1.162$
 $K2 = 0.000$ (forced to zero by user)
 $u = 1.555$
Coefficient of determination: 0.99998604

All warning messages for this table
No warnings.

La ecuación de gasto, mostrada en la figura anterior, no presenta ninguna observación del sistema Winflume y exhibe la ecuación siguiente:

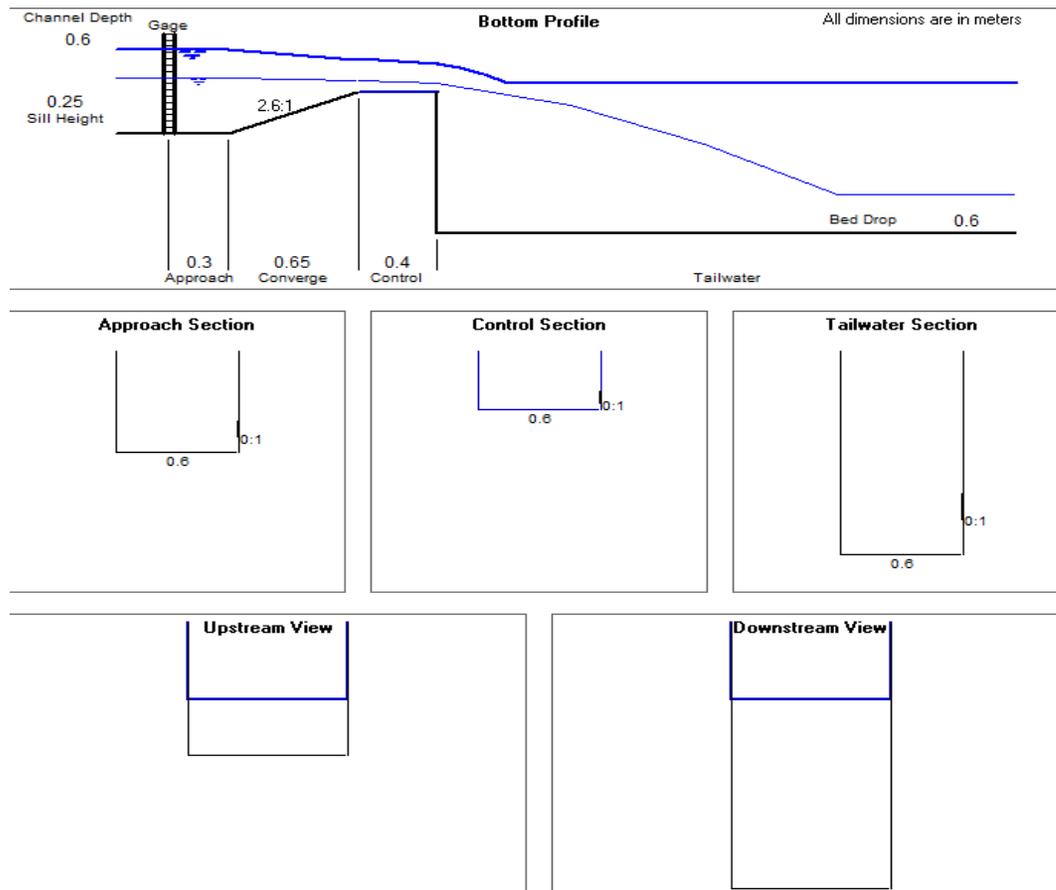
$$Q = 1.16h^{1.555}$$

Que es la ecuación con la que se emulan los datos de campo, suficientes ejemplos de cálculo se presentan a continuación.

Lo cual determina el orden de caudales requeridos por el análisis hidrológico a través de la ecuación racional modificada.

De esta manera, el aforador solicitado por el jefe de proyecto es aquel que cumple con la calidad de estructura móvil, fácil de instalar y válida en los rangos de los caudales de escurrimiento. Su diseño geométrico se presenta a continuación.

h (carga en m)	Q (Gasto en lps)
0	0
0.001	0.02513079
0.01	0.90199915
0.05	11.0180436
0.1	32.374728
0.15	60.8174261
0.18	80.7522949
0.2	95.1278697
0.22	110.324863
0.24	126.309091
0.26	143.0506



Se debe mencionar que dicho aforador es funcional con la condición de que se encuentre con un régimen de funcionamiento hidráulico a descarga libre. En este caso, sin importar la existencia de

una caída, por tal razón es útil para medir caudales en otras parcelas de otras condiciones topográficas.

Ventajas del diseño construido.

- 1) Es una estructura portátil
- 2) Sirve para medir caudales en el rango de 0 a 140 lps.
- 3) Es fácil de instalar en campo
- 4) Es funcional en otras parcelas.

En el Medidor Ultrasónico se desarrolló la programación adecuada para el manejo del Sensor ultrasónico, así como el procedimiento para almacenamiento de la información en una tarjeta de memoria externa Micro SD además de procesar la información almacenada y poder enviarla en tiempo real vía GPRS.

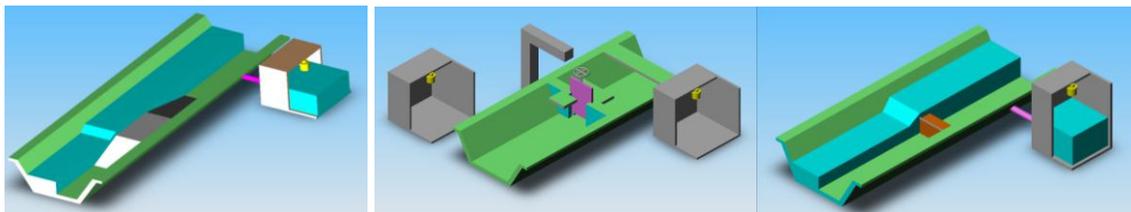
Se desarrolló el Diagrama esquemático electrónico en el cual se ensamblan los componentes electrónicos como sensores, cableados y memoria externa, se anexo una pantalla GLCD 128x64 para mostrar la información obtenida, los datos que muestra son: tirante, gasto, temperatura, hora y fecha, se agregó el diseño de una placa de circuito impreso con adaptación para el sensor de temperatura.

Se realizaron pruebas e instalación de los equipos. El medidor ultrasónico envía la información vía GPRS en tiempo real a una cuenta de correo electrónico en la cual se almacena la información y después es manipulada por el usuario para obtener graficas del día o mensual según se requieran.

A continuación de anexan fotos e información de los componentes que se utilizan así como también su funcionamiento.

Este medidor ultrasónico es utilizado en campo con estructuras de apoyo, tales como:

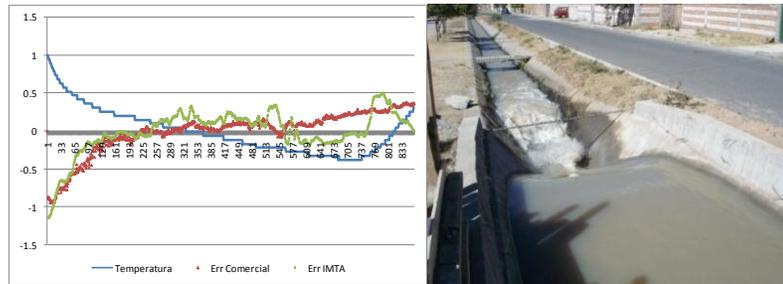
- Aforadores (descarga libre)
- Vertedores (descarga libre)
- Compuertas (deslizantes y radiales a descarga libre y ahogada)



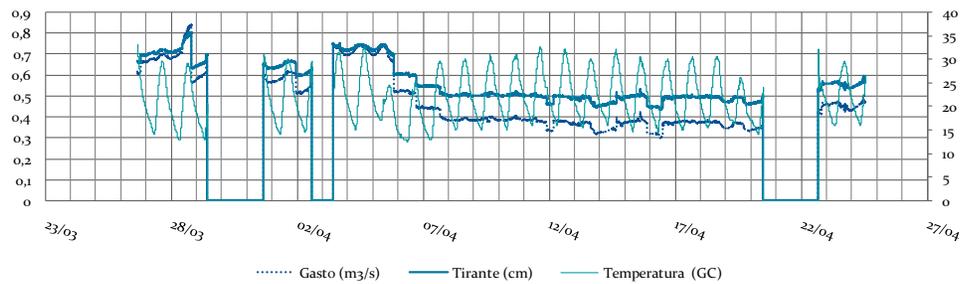
El cual se realizaron pruebas en campo para comparar su comportamiento con un medidor ultrasónico convencional y los resultados fueron aceptables.

Fue puesto a prueba el funcionamiento del equipo con fines de estimación de una distancia y en el rango de funcionamiento de 20 cm a 2 metros, el principal resultado fue la obtención de una desviación estándar equivalente a 3 mm (precisión del equipo).

Segundo, se comparó al funcionamiento de un equipo comercial disponible en el mercado y se determinó un orden de magnitud equivalente en precisión, como se muestra a continuación:



Evolución de la Temperatura, Tirante y Caudal en el AGL del M1



El medidor ultrasónico cuenta con los siguientes componentes:

- Microcontrolador
- Teclado Matricial
- Sensor Ultrasónico
- Sensor De Temperatura
- Memoria SD
- Sistema para envío de información GSM y GPRS
- Pantalla de Cristal líquido GLCD



El microcontrolador es el modelo PIC18F8722, de microchip, cuenta con 9 puertos bidireccionales, a los cuales van conectados los diferentes elementos que componen el medidor, la tarjeta de almacenamiento de datos, el teclado numérico, así como los sensores ultrasónicos y de temperatura.



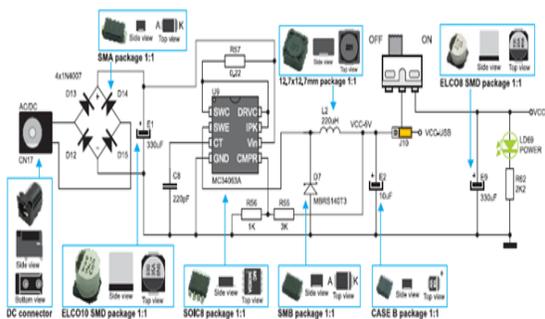
El teclado numérico nos sirve para interactuar con el equipo y poder configurar de un modo más particular cada medidor, como podría ser la ecuación de gasto, el offset, la calibración, entre otros datos.



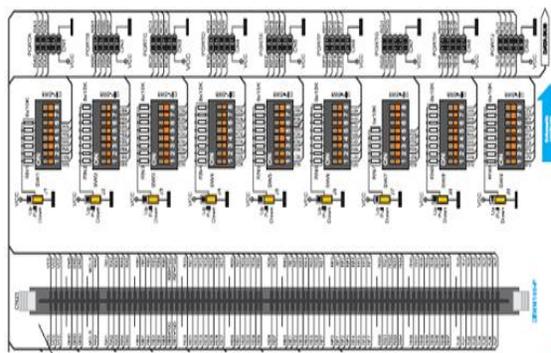
La función del sistema para envío de información GSM y GPRS, es de proporcionar la fecha y hora para el registro de los datos censados. Este elemento está conectado al puerto RS.232 del micro, puede ser configurable en cualquier momento, además tiene la opción de enviar SMS y envío de información vía GPRS.



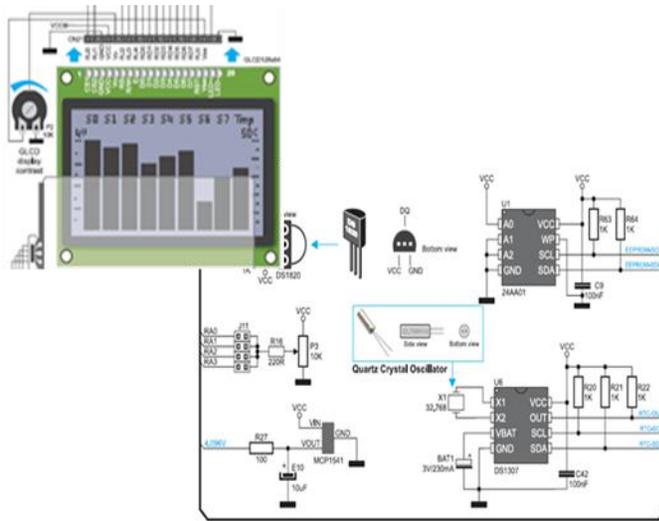
La memoria de almacenamiento y adaptador nos permite poder almacenar la información recolectada por el equipo en una tarjeta de memoria SD de hasta 2 Gb, registrándola en un archivo txt el cual es fácil de manipular para el procesamiento de la información. Funciona con el protocolo de comunicaciones SPI y está conectado al puerto C del micro, ya que en ese puerto es donde se encuentra el hardware de comunicaciones.



La fuente de voltaje consta de un puente de diodos, reguladores de voltaje, resistencias, capacitores, supervisor de voltaje, botón de encendido y apagado e indicador de encendido. Dicha fuente puede soportar voltajes desde 12 Vcd-36 Vcd, además de tener los capacitores necesarios para el filtrado del voltaje con el cual se está alimentando el equipo, proporcionar el suficiente voltaje y corriente para el funcionamiento de los demás componentes electrónicos y así garantizar que la tarjeta del medidor de caudal no sufra algún corto circuito.



La ubicación del microcontrolador es uno de los más importantes de la tarjeta del medidor de caudal ya que es el que realiza las operaciones y en función de donde se coloque será la ubicados los puertos de entrada o salida los cuales estos interactúan con equipos electrónicos así como el sensor ultrasónico, el sensor de temperatura, teclado para ingresar los datos que según se requieran, además de conectar un zócalo para colocar un SD para guardar los datos que proporcione el sensor ultrasónico.

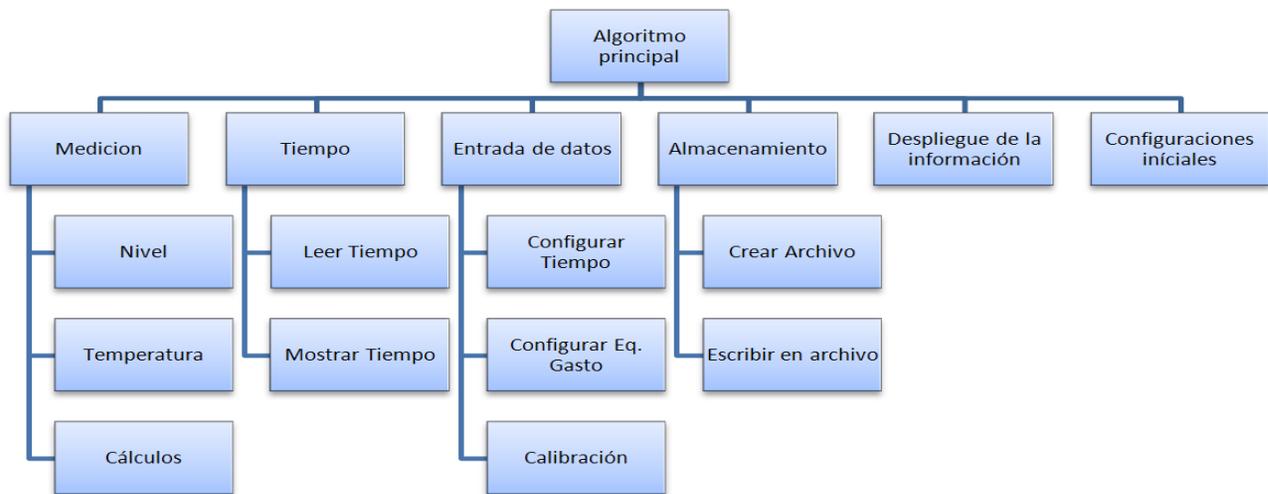


La pantalla Glcd: En ella se muestra los datos correspondientes de cada medición que proporciona el sensor de ultrasónico. El RS-232 son utilizados según los requiera el usuario, ya sea para el envío de información o para recibir información.

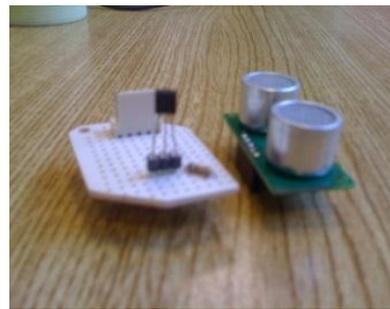
La pantalla Glcd: En ella se muestra los datos correspondientes de cada medición que proporciona el sensor de ultrasónico. El RS-232 son utilizados según los requiera el usuario, ya sea para el envío de información o para recibir información.

Sensor ultrasónico y de temperatura: El sensor de temperatura es de gran importancia en el sensor ultrasónico, ya que en medidor funciona con un sensor el cual emite ondas de ultrasónico y esta onda viaja a una velocidad la cual es afectada por la temperatura por lo tanto el sensor de temperatura nos proporciona la temperatura que se encuentra en ese momento y se hace una corrección de temperatura para que la medición del sensor ultrasónico sea exacta.

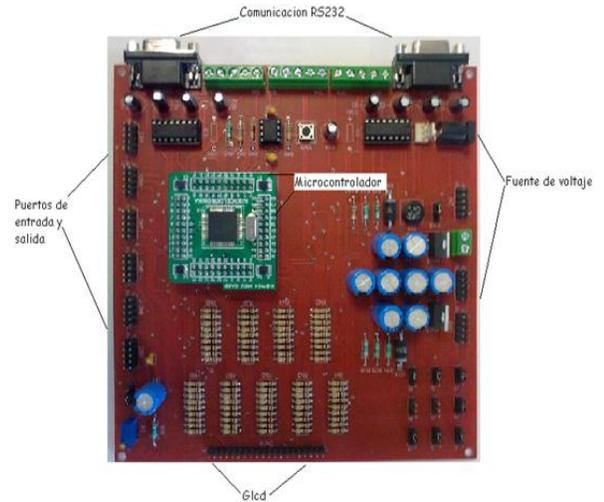
DIAGRAMA DE PROGRAMACION DEL EQUIPO DE MEDICIÓN



SENSOR ULTRASÓNICO Y DE TEMPERATURA



TARJETA DE MEDICION Y MEDIDOR COMPLETO





6.1.6. Construcción de estructura móvil para medición de caudal

Se construyó un prototipo de estructura móvil para una vez instalado en la misma el caudalímetro ultrasónico, se pueda medir el tirante y obtener el gasto. Se presentan aquí algunas fotografías del proceso de construcción.



El cuerpo del aforador en construcción



La canaleta de aforo terminada



La caja de amortiguación en construcción



La caja de amortiguación terminada



Ensamblando canaleta aforadora con caja de amortiguación

6.1.7. Instalación de estructura móvil y caudalímetro ultrasónico

Una vez construida la estructura móvil de medición y habiendo verificado medidas y dimensiones del mismo. Con base en el diseño indicado por el jefe de proyecto, se procedió a su traslado a campo, para su instalación.

A continuación se muestran algunas imágenes que permiten apreciar este proceso.



Iniciando los trabajos para instalación de aforador. Se niveló el suelo.



El proceso de ensamble de caja amortiguadora y canaleta de aforo



La estructura de aforo con medidor ultrasónico instalada.

Como fue calculado por esta estructura pasan 140 lps. En funcionamiento será necesarios reforzar los bordos.



Acercamiento al equipo ultrasónico de medición del tirante

6.1.8. Información obtenida del medidor

El medidor ultrasónico capta la altura del espejo del agua (en el pozo de amortiguación) y realiza el proceso de calcular el tirante en el cauce. La información obtenida del medidor es almacenada en una memoria SD y puede ser tomada de ahí para su procesamiento, o puede también ser enviada a través de un SMS o un correo electrónico.

El medidor tiene también un sensor de temperatura que permite corregir los cálculos debido a la alteración que pudiera tenerse por este factor en el proceso de medición.

6.2. Pluviómetro de autosifonamiento

Este pluviómetro es un aparato registrador que mide continuamente a través del tiempo, la cantidad de lluvia precipitada. Esto permite obtener también la intensidad de la lluvia, que es un dato importante para varios estudios agronómicos, hidrológicos, y de conservación y erosión de suelos.

La precipitación puede medirse en dos unidades: en litros por metro cuadrado o en milímetros. Ambas unidades son equivalentes, los milímetros significan la altura del agua que se alcanzaría sobre una superficie impermeable de 1 metro cuadrado.

$$1\text{mm de precipitación equivale a: } 1\text{ m}^2 * 0,001\text{ m} = 0,001\text{ m}^3 = 1\text{ litro}$$

Dicho pluviómetro, consta de una superficie colectora, que contiene un embudo, la boca superior del embudo tiene una superficie de 490.87 cm^2 (25.0 cm de diámetro) el cual tienen una arista viva para evitar pérdidas de agua por salpicadura, el agua recogida por el embudo, se recolecta en un depósito y/o tanque de (25 cm de diámetro x 11 cm altura) el cual recurre a un sifón. El proceso de actuación del sifón debe comenzar precisamente en el momento oportuno después de que el sensor ultrasónico (situado en la parte superior del depósito) haya tomado la lectura de precipitación y sin tendencia a que el agua rebose o produzca goteos fuera del tanque, ni al principio ni al final de la actuación del sifón, el proceso de sifonaje no debe prolongarse más allá de 1 minuto para que el tanque quede totalmente vacío.

$$\text{Precipitación en mm (embudo)} = \text{Volumen en cm}^3 / \text{superficie cm}^2$$

$$49.087\text{ cm}^3 / 490.87\text{ cm}^2 = 0,1\text{ cm} = 1\text{ mm}$$

De forma general:

Para calcular el coeficiente de precipitación del embudo, dividir el volumen en cm^3 recogido en el pluviómetro en función del tamaño del embudo.

$$\text{Precipitación en mm} = \text{Volumen en cm}^3 / [0,1 * \pi/4 * (\text{diámetro del embudo en cm})^2]$$

Cuadro 7. Coeficiente/ cm² en función al tamaño del embudo.

Diám embudo	Coeficiente	Diám embudo	Coeficiente
cm ²	cm ²	cm ²	cm ²
1	0.07854	21	34.63614
2	0.31416	22	38.01336
3	0.70686	23	41.54766
4	1.25664	24	45.23904
5	1.9635	25	49.0875
6	2.82744	26	53.09304
7	3.84846	27	57.25566
8	5.02656	28	61.57536
9	6.36174	29	66.05214
10	7.854	30	70.686
11	9.50334	31	75.47694
12	11.30976	32	80.42496
13	13.27326	33	85.53006
14	15.39384	34	90.79224
15.95	19.9807724	35	96.2115
16.5	21.382515	36	101.78784
17	22.69806	37	107.52126
18	25.44696	38	113.41176
19	28.35294	39	119.45934
20	31.416	40	125.664

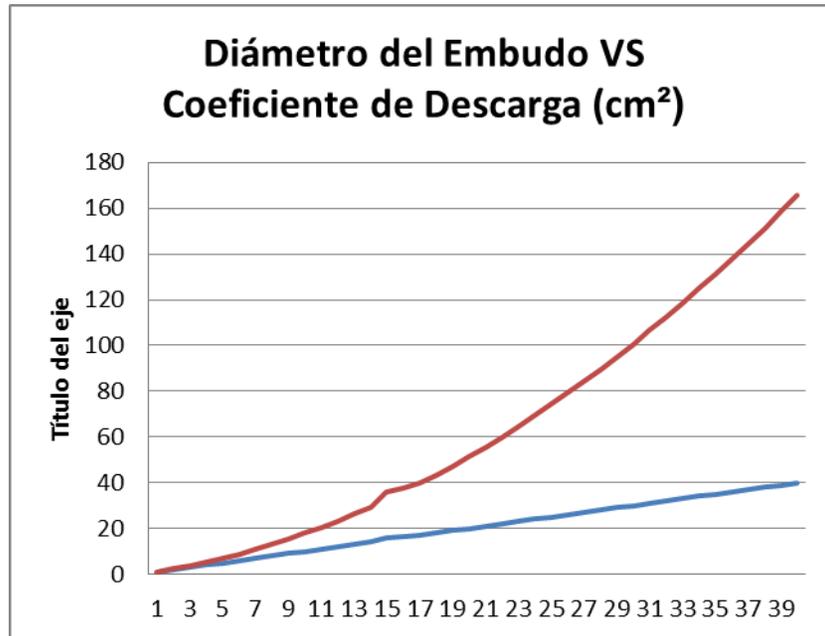


Figura 29. Relación coeficiente/diámetro de embudo.

A continuación se muestran los componentes del pluviometro:

1. Superficie colectora del embudo de 10" de diametro.
2. Embudo
3. Tubo de alimentación de 1/2" para el deposito y/o tanque.
4. Sifon, con un tubo de salida de 1/2"
5. Llave de bola de 1/2" para el desfogue de agua del deposito cuando requiera mantenimiento
6. Tanque receptor de 10" de diametro y 12 cm de altura
7. Soporte para el sensor ultrasonico SRF05
8. Sensor ultrasonico SRF05
9. Cable de datos del sensor ultrasonico, resistente al agua de 250 volts y 4 amperes

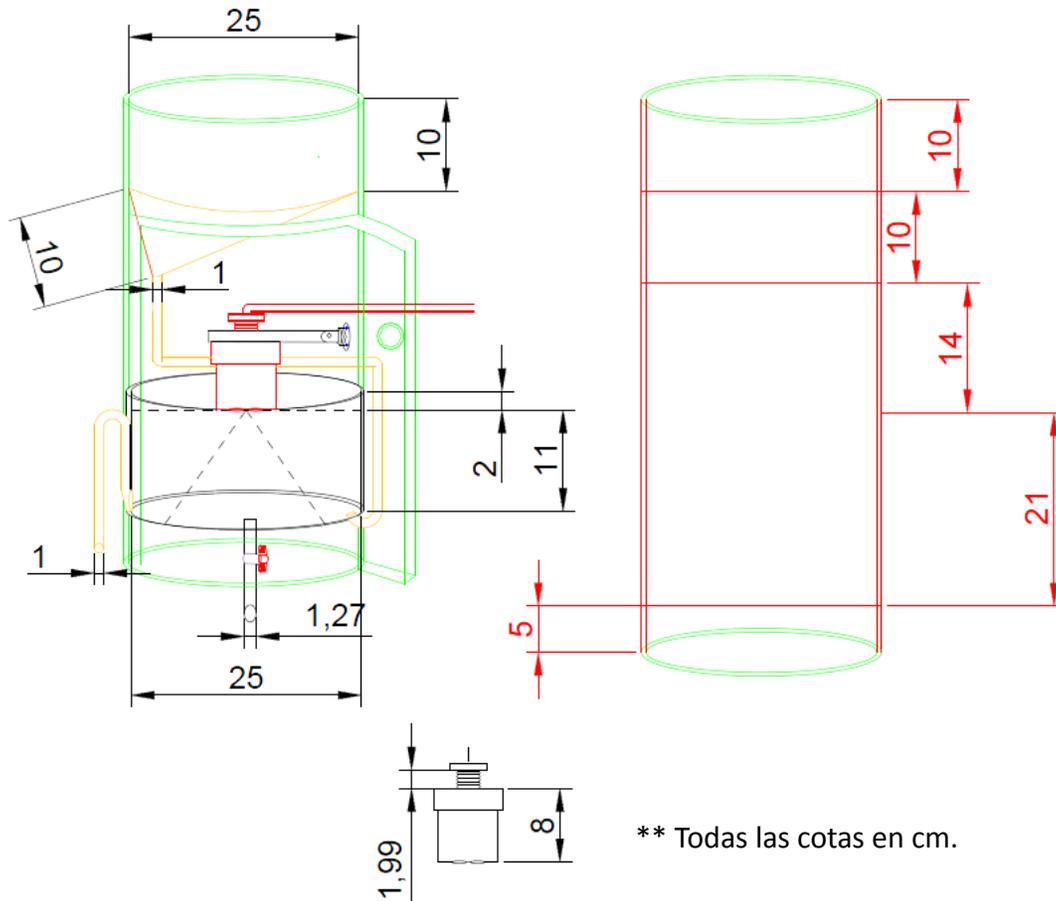


Figura 30. Diagrama del pluviómetro de autosifonamiento.

6.2.1. Prototipo de pluviógrafo

Con el diseño del pluviómetro realizado en el apartado anterior y luego de una revisión minuciosa de las medidas y capacidades del dispositivo, se procedió a la construcción de un prototipo de pluviógrafo, con el cual se medirá la precipitación y se registrará su ocurrencia en el tiempo, datos con los cuales se puede obtener la intensidad de la lluvia. Las imágenes que a continuación se muestran presentan algunas etapas del proceso de construcción.



Figura 31. Iniciando la construcción del prototipo de pluviógrafo



Figura 32. Otra etapa en la construcción del pluviógrafo



Figura 33. El prototipo de pluviógrafo terminado

6.2.2. Instalación del pluviógrafo en campo

Una vez terminado, probado y calibrado el pluviógrafo con medidor ultrasónico, se llevó a campo para su instalación en la parcela en que se está midiendo el escurrimiento con la estructura móvil y caudalímetro ultrasónico. Al igual que el caudalímetro el sensor ultrasónico mide la altura del agua en el tanque de captación del pluviógrafo, registra la información y la almacena en una memoria SD de donde puede ser tomada para su procesamiento, o puede también ser enviada a través de un SMS o un correo electrónico. El medidor tiene también un sensor de temperatura que permite corregir los cálculos debido a la alteración que pudiera tenerse por este factor en el proceso de medición



Instalando el pluviógrafo en campo



El pluviógrafo ya instalado en campo

7. CONCLUSIONES

Del trabajo realizado se pueden hacer los siguientes comentarios a manera de conclusiones:

- a) La metodología del diseño hidrológico del terreno en Línea Clave (Keyline), tiene sus orígenes en Australia. A pesar de que data de los años 1950's y del éxito mostrado, no ha tenido un reconocimiento "oficial" del sector académico y gubernamental relacionados con el campo agropecuario. Es probable que debido a ello no haya tenido hasta el momento presente la difusión que merece. En México es prácticamente desconocida esta metodología de planeación del terreno para una mejor cosecha y aprovechamiento del agua de lluvia en zonas de temporal.
- b) Los resultados obtenidos de los experimentos realizados en dos parcelas en el municipio de Jantetelco, Morelos, en suelos delgados del tipo regosol- mostraron que labrando el terreno siguiendo el método de la Línea Clave (Keyline) se retiene mayor cantidad de agua en el suelo y por más tiempo, que si se laborea el terreno con el método tradicional. El cultivo sembrado fue sorgo forrajero de temporal. La lluvia promedio anual en la zona es de 865 mm y la altitud de 1,405 metros sobre el nivel del mar.
- c) En cuanto al rendimiento del cultivo probado (sorgo forrajero) se tuvo un incremento en rendimiento del 13% al compararse con parcelas cultivadas con el surcado tradicional..
- d) Los resultados encontrados muestran una clara tendencia de que se conserva más agua (y por más tiempo) en el suelo con el método de la Línea Clave o Keyline en la agricultura.
- e) La construcción del prototipo de pluviómetro digital y estructura móvil del tipo aforador de garganta larga, ambos basados en el medidor ultrasónico de nivel y equipados con sistema de telemetría para la recuperación de la información, permitirá que en estudios subsecuentes relativos al tema se puedan medir variables como precipitación y escurrimiento in situ, lo que arrojará más elementos que permitan caracterizar con mayor precisión el efecto del surcado de parcelas agrícolas (y en general todos los otros usos del suelo).

8, BIBLIOGRAFÍA

Colegio de Postgraduados (CP). 1977. Manuel de conservación del suelo y del agua. SARH-SPP. Chapingo, México. 574p + apéndices.

Gras, Eugenio. 2010. Cosecha de agua y tierra. Diseño con Permacultura. Ediciones COAS (Consejeros en Agricultura Regenerativa y Permacultura. Brasil-Colombia-México). México. 230p.

MacDonald-Holmes, J. s/f. The geographical and topographical basis of Keyline. 47p.

U.S.D.A. Soil Conservation Service. 1989. National Handbook of Conservation Practices. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. U.S:A.

Yeomans, P.A. 1993. Water for every farm. Yeomans Keyline Plan. Griffin Press Pty Limited. Netley, South Australia. 261p + Index.

Yeomans, P.A. 1971. The City Forest. P.A.Yeomans Pty. Limited. Sydney, Australia. 82p.

Yeomans, P.A. 1954. Keyline Plan. Waite and Bull. Sydney, Australia. 125p.

Yeomans, P. A. 1958. The Challenge of Landscape. Keyline Publishing Pty. Limited. Sydney, Australia. 273p.