Adecuación de Tierras

Ricardo Cruz V. y Oscar Mario López*

Introducción

La adecuación de tierras es una de las labores más importantes en el cultivo de la caña de azúcar; por una parte, demanda una alta inversión inicial —aproximadamente el 22% de los costos totales de una plantilla— y por otra, con ella es posible: (1) Suministrar agua para riego y drenar los excesos de ésta en el suelo. (2) Mejorar la eficiencia del riego, de los equipos y del personal involucrado en las labores de campo. (3) Incrementar la productividad del cultivo. (4) Acondicionar las vías para el transporte rápido y seguro de la caña hasta la fábrica.

Por las razones anteriores, esta labor se considera básica para la producción y, por lo tanto, debe ser planeada, diseñada y ejecutada por un equipo de personas especializadas.

En este capítulo se describen las prácticas y los procedimientos que se utilizan en la adecuación de tierras para el cultivo de la caña de azúcar, estos comprenden: estudios básicos, diseño de campo, nivelación del terreno, infraestructura hidráulica y de vías, programación de labores y costos de adecuación.

Estudios Básicos

Incluyen los estudios de suelos, topográficos, de oferta y demanda de agua para riego, de drenaje, de selección de métodos de riego, y de vías y estructuras hidráulicas necesarios para el diseño de campo.

Estudio de suelos

Este estudio contiene el plano con las series de suelo y las características físicas y químicas principales, tales como: textura; estructura; constantes de humedad; densidad aparente; infiltración; conductividad hidráulica y eléctrica; pH; capacidad de intercambio catiónico; y contenidos de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y elementos menores. Asimismo incluye las recomendaciones sobre uso y manejo del suelo.

* Ricardo Cruz es Ingeniero Agrícola, MSc. en Manejo de Aguas. CENICAÑA, Apartado Aéreo 9138, Cali, Colombia. Oscar Mario López es Ingeniero Agrónomo del Ingenio del Cauca, Apartado Aéreo 6705, Cali, Colombia.

Estudio topográfico

Incluye áreas y planos sobre la localización y la altura de las infraestructuras civil e hidráulica, patios de transbordo, fábrica, vías, canales, linderos permanentes, cauces naturales y curvas a nivel.

Estudio de riego

El estudio de riego debe ser un verdadero plan maestro que incluya los balances entre la oferta y la demanda de agua, suficientes para calcular su déficit o exceso en el área. Debe contener los proyectos de desarrollo de aguas, embalses, pozos, estaciones de bombeo, bocatomas, conducciones abiertas y por tubería, obras menores, selección de los métodos de riego y requisitos para su operación, número aproximado de riegos por temporada, intervalos entre riegos, volúmenes de agua por riego, tiempos de operación, caudal equivalente o módulo de riego operativo, caudales de entrega, programación de riegos, pendientes y longitudes de surco requeridas.

Estudio de drenaje

Constituye un complemento a los estudios de riego e incluye la medición de la profundidad de los niveles freáticos, las fuentes de recarga y los obstáculos para la descarga que puedan causar un problema de drenaje en el área del proyecto. En él se deben incluir los métodos de drenaje superficial y subterráneo, y las necesidades de subsolado y construcción de drenes topo para el mejoramiento de la infiltración y la conductividad hidráulica.

Diseño de Campo

El diseño de campo es el proceso mediante el cual se realiza la división del área del proyecto en sectores, suertes y tablones; incluye los cálculos y los planos de localización y diseño de la infraestructura de riego, drenaje, vías, y longitud y dirección de los surcos.

Teminología

Los términos más comunes que se utilizan en el diseño de campo son:

Sector. Es una parte del predio que se delimita teniendo en cuenta la topografía, la dotación de agua, las vías principales, los drenajes profundos y los accidentes naturales.

Suerte. Es la unidad parcelaria en que se divide una hacienda, finca o predio sembrado en caña de azúcar; por lo general, tiene forma regular y se encuentra delimitada por callejones, carreteras y canales, cuya superficie puede abarcar desde 1 hasta 25 ha, o más.

Tablón. Es una subdivisión de la suerte, delimitada también por callejones menores, canales y acequias de riego o drenaje.

Las dimensiones más comunes de los tablones varían entre 200 y 600 m de largo x 100 a 250 m de ancho.

Callejón. Es una franja de terreno dentro del cultivo que sirve como vía de acceso y para el transporte de la caña.

Estaciones de transbordo. Son áreas, aproximadamente de 0.25 ha, ubicadas en forma paralela a las carreteras principales en haciendas o predios que distan más de 12 km de la fábrica. En ellas se hace el transbordo de la caña cosechada, desde vagones convencionales o de autovolteo a las tractomulas.

Canales principales. Coducen grandes volúmenes de agua y se encuentran a nivel de varias fincas o haciendas.

Canales primarios. Son aquéllos que suministran o evacúan agua a nivel de la hacienda o del predio.

Canales secundarios. Parten de un canal primario y sirven para suministrar agua o para drenar varias suertes.

Canales terciarios, acequias o rondas. Son los canales internos de cada suerte o tablón. Se construyen en forma transversal a los surcos y sirven para suministrar o para drenar el agua a través de éstos.

Corona de riego. Es una estructura hidráulica que consta de un dique o banca y un canal abierto que se traza sobre la corona o cresta del dique.

Reservorios. Son estructuras hidráulicas construidas para el almacenamiento de agua proveniente de pozos profundos, ríos, lluvias ó sobrante de canales y zanjones.

Procedimiento para el diseño de campo

Para el diseño de campo es necesario obtener información sobre las características de los predios y ejecutar algunos trabajos adicionales, principalmente:

1. Obtener información de la topografía del predio sobre planos a escalas que permitan una clara diferenciación de los accidentes de la superficie que se va a adecuar. Las escalas más comunes son 1:1000, 1:2000, 1:2500 y 1:4000.

   Las curvas de nivel se deben dibujar con base en cotas localizadas sobre cuadrículas, de acuerdo con la pendiente del terreno, de la manera siguiente:

Terreno	Pendiente (%)	Cuadrícula (m)	Diferencia de nivel (m)
Muy plano	< 0.4	20 x 20	0.20
Plano	0.4-0.7	20 x 20	0.25
Pendiente	> 0.8	30 x 30	0.50

En los planos se deben ubicar, en forma precisa, linderos, vías principales, construcciones, fuentes de agua, estaciones de bombeo, entradas y salidas de agua, guaduales, bosques y zonas húmedas, ya sea para su conservación o para modificarlos posteriormente.

2. Efectuar una visita al predio o a la hacienda para comprobar los detalles que aparecen en los planos y complementar otros de importancia, principalmente: características del perfil del suelo, presencia de rocas o grava y sitios que presenten problemas, aforo de aguas, características de las vías de acceso, servidumbres existentes, distancias del predio a la fábrica, instalaciones y su estado e información sobre clima.

3. Sectorizar el campo de acuerdo con la topografía, los accidentes naturales, las fuentes de agua para riego y las obras para la evacuación del exceso de agua.

4. Seleccionar y diseñar uno o varios métodos de aplicación de riego, según las necesidades del cultivo.

5. Definir la dirección más apropiada para el flujo de la caña cosechada hacia el patio de transbordo o la fábrica, mediante la localización de los callejones y las vías principales que rodean el sector; demarcar las suertes, los tablones y la dirección de los surcos con una longitud entre 100 y 150 m y una pendiente máxima del terreno de 0.8%. El ángulo de intersección de las vías debe variar entre 80° y 100°, con el objeto de facilitar el trabajo de los equipos utilizados para el transporte.

6. Trazar el sistema de canales abiertos para drenaje. Estos canales mejoran el drenaje general de la finca; por lo tanto, se deben construir en los sitios más bajos de la zona, preferiblemente en aquéllos con problemas de humedad. Con base en el estudio previo del nivel freático del campo, el sistema de drenaje abierto se puede complementar con redes de drenaje entubado que, a su vez, indican la pauta para eliminar algunos cauces abiertos. Todos los canales se deben construir, en lo posible, paralelos a la dirección de los surcos de siembra. En caso contrario, se debe construir un callejón intermedio que permita el transporte de la caña cosechada.

7. Trazar el sistema de canales abiertos para riego aprovechando las partes altas de las suertes y tablones. Estos canales, al igual que los canales para drenaje, se deben ubicar, hasta donde sea posible, en forma paralela con la dirección de los surcos de siembra, excepto las acequias o rondas que se disponen de manera perpendicular. En el sistema para la conducción de agua, los canales de riego deben ser independientes de los de drenaje.

8. Ubicar y diseñar las estructuras hidráulicas complementarias, tales como reservorios, coronas, tuberías subterráneas para riego, sifones y viaductos.

9. Elaborar los presupuestos y el cronograma de actividades de los trabajos adicionales.

10. Elaborar a escala adecuada el plano general sobre el diseño de campo en cada hacienda, incluyendo la topografía, la dirección de los surcos, el sistema de distribución y evacuación de agua, las vías de comunicación, los circuitos de cosecha, y el registro de las áreas total y neta en cultivos de caña.

11. Levantar el plano del sector, detallando a nivel de cada suerte, la información que aparece en el plano general y la ubicación de las estructuras hidráulicas.

Nivelación del Terreno

La nivelación consiste en la modificación del relieve superficial mediante cortes y rellenos, hasta conseguir pendientes uniformes que faciliten las labores de riego y drenaje superficiales y la ejecución de otras labores culturales, necesarias para el desarrollo y cosecha del cultivo de la caña de azúcar.

La nivelación es costosa y puede afectar la fertilidad del suelo; por lo tanto, se debe realizar con el criterio de mínimo movimiento de tierra conservando, en lo posible, el promedio de las pendientes del campo.

La topografía del terreno se puede modificar por medio de las labores siguientes:

Macronivelación. Consiste en el movimiento de grandes volúmenes de tierra que implican cortes entre 10 y 20 cm, de acuerdo con el tipo de suelo.

Micronivelación. Son movimientos menores de suelo que se hacen para uniformizar pequeñas irregularidades y rugosidades.

Criterios para la nivelación del terreno

La nivelación del terreno se debe planear teniendo en cuenta las condiciones del perfil del suelo y la profundidad máxima de corte a la cual se puede efectuar sin afectar la producción agrícola. Los suelos con limitaciones de corte se deben manejar con un tratamiento especial de nivelación; por ejemplo, con descapote y nivelación del subsuelo. Si los suelos tienen poco espesor y la topografía es ondulada o de pendiente fuerte, no se deben nivelar, debido al alto costo y el peligro de erosión que conlleva esta práctica.

Cuando en un mismo terreno se utilizan varios sistemas de riego, se deben tener en cuenta los requerimientos del más limitativo. Por ejemplo, el riego por gravedad presenta la mayor exigencia en relación con la pendiente y el diseño de campo en comparación con otros sistemas.

Labores previas a la nivelación

Limpieza. Las operaciones de limpieza dependen de las especies vegetales presentes en el campo. Estas pueden encontrarse formando potreros, rastrojos o bosque secundario.

La limpieza de campos cubiertos por potreros de gramíneas o socas de cultivos, se puede hacer de varias formas: (1) con animales en pastoreo, para eliminar la mayor cantidad de gramíneas existentes; (2) con guadaña o cortadora rotativa. En este caso, el pasto después del corte se deja secar y posteriormente se quema; y (3) mediante la quema en secuencia de lotes dentro del campo.

La eliminación de rastrojos se hace, por lo general, con tractores. Los rastrojos con plantas de tallos delgados se pueden eliminar con rastras pesadas de 12 x 36"[2], 20 x 36", 28 x 32". Para eliminar rastrojos con mayor desarrollo se emplean tractores con llantas a los cuales se les adaptan cables o cadenas para el arranque y movimiento de los arbustos. En ocasiones, para esta última labor es necesario emplear tractores de oruga.

En el caso de los bosques secundarios, se utilizan tractores de orugas. Los árboles y arbustos removidos se pueden utilizar como madera o para leña; y los residuos resultantes se destruyen mediante la quema.

En la limpieza del campo se pueden encontrar rocas o escombros, que se recolectan y colocan en sitios aislados, con el fin de facilitar las operaciones agrícolas posteriores.

Es importante tener en cuenta que las zonas de protección de ríos y cauces naturales no se deben destruir, ya que esto afecta en forma negativa la estabilidad de las cuencas y el régimen hídrico de la región.

Destrucción de cepas. Esta labor implica dos pases de la maquinaria y se utiliza para la renovación de cepas de caña; el primer pase, se hace en el sentido del surco y, el segundo, en forma cruzada y perpendicular al primero. Se utilizan para el efecto tractores de oruga de aplicación especial con 165 HP y equipados con rastras de 12 x 36", 16 x 32"; o tractores con llantas y más de 250 HP, equipados con rastras de 20 x 36", ó 28 x 32".

Rastrillada. Con esta labor se reduce el tamaño de los terrones resultantes en la destrucción de las cepas y se facilita, de esta manera, una óptima nivelación. Se utilizan tractores con 165 HP y rastras de 24 x 26", 28 x 26"; o tractores con más de 350 HP y rastras de 56 x 24", 62 x 26", 80 x 26", ó 92 x 26", procurando hacer el último pase en el mismo sentido de la siembra.

Cálculos para la nivelación de tierras

Los cálculos para la nivelación de tierras incluyen la determinación de las pendientes, la altura de corte o relleno en cada punto de la cuadrícula y el volumen de tierra que se debe mover. Es importante anotar que cuando es necesario descapotar, los volúmenes de suelo que se deben mover, las horas-máquina y los presupuestos aumentan de manera considerable. Entre los métodos de cálculo más utilizados se encuentran los perfiles promedios, el centroide, y la rectificación o ajuste de las curvas a nivel.

[2] La primera cifra se refiere al número de discos de la rastra y la segunda al diámetro de éstos, en pulgadas.

La siguiente es una clasificación aproximada de los volúmenes de tierra que con frecuencia se mueven en la adecuación de campos para el cultivo de la caña de azúcar:

Clasificación	**Volumen de suelo** (m^3/ha)
Bajo	< 400
Moderado	400 a 600
Alto	> 600

Demarcación del campo. Consiste en señalar en el terreno los callejones, las vías principales, los canales de riego y de drenaje, la dirección de los surcos y demás componentes del diseño, factores que es necesario tener en cuenta en las labores de nivelación y para facilitar los trabajos y la distribución de la maquinaria, evitando, de esta forma, la repetición de movimientos de tierra, bajos rendimientos y aumento en los costos.

Maquinaria y equipos utilizados para la nivelación de terrenos

Selección del equipo. Para la selección de la maquinaria y el equipo de nivelación se deben tener en cuenta: el tipo de suelo, el área, el tiempo disponible, las distancias de acarreo, el volumen de suelo que es necesario mover, la disponibilidad de maquinaria y equipos, el grado de precisión que requiere la obra, y los rendimientos y costos.

Equipos y rendimientos. Como una guía general en el Cuadro 1 se presentan los rendimientos, en horas-máquina/hectárea, de algunos de los equipos más comunes para la nivelación de campos destinados al cultivo de la caña.

En terrenos con cortes menores de 10 cm y áreas mayores de 30 ha, se usa el equipo de nivelación láser, incorporado a las traíllas o al marconivelador.

Cuadro 1 **Rendimiento aproximado de algunos equipos utilizados para la nivelación de terrenos cultivados con caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia.**

Tractor	Equipo	Rendimiento (horas-máquina/ha)
Con llantas, 375 a 475 HP	Doble traílla de 15 y 18 yardas cúbicas cada una	3 a 6
Con llantas, 165 HP	Marconivelador (Micronivelación)	12 a 16
De orugas	Pala delantera	12 a 28
Motoniveladora	Pala y escarificador incorporados	1 a 3

FUENTES: Ingenio del Cauca y Central Castilla.

Los tractores de oruga con pala o cuchilla delantera se utilizan para macronivelación, siempre y cuando los recorridos sean menores de 60 m. Para movimientos de tierra a distancias mayores, se deben emplear las traíllas.

La nivelación de suertes previamente explanadas y que presentan pocos problemas en su topografía, se hace mediante una micronivelación, complementada con 1 a 3 horas de motoniveladora por cada hectárea.

Para la formación final de las cabeceras de riego, callejones, drenajes terciarios o bateas, se puede utilizar una motoniveladora con una eficiencia de 2 a 5 horas-máquina/ha.

Control de la nivelación

Consiste en verificar la nivelación utilizando un medio topográfico. Para el efecto, con el nivel de precisión se verifican sobre el terreno las cotas de la cuadrícula y las vías de riego y drenaje en cada tablón de la suerte, con la finalidad de corregir las posibles fallas y continuar con los trabajos de preparación del terreno.

Estructuras Hidráulicas

Obras de protección contra inundaciones

Entre estas obras, las más comunes son los jarillones o diques paralelos, y la rectificación y canalización de arroyos, ríos y quebradas.

Los jarillones o diques son estructuras de forma trapezoidal, construidas con tierra compactada sobre el lado y en forma paralela a un cauce natural para evitar su desbordamiento. Para la construcción de dichos diques existen algunas normas oficiales, que en el caso del Valle del Cauca son reguladas por la Corporación Autónoma Regional (CVC).

La rectificación y canalización de los cauces naturales tienen por finalidad conformar secciones hidráulicas apropiadas para el flujo normal de las corrientes. Para su diseño se sugiere consultar en la CVC, ya que toda obra de adecuación de cauces —ríos y quebradas— afecta su estabilidad; por lo tanto, deben ser planeadas, dirigidas y supervisadas por especialistas, con el fin de evitar desastres posteriores.

Obras para la captación de agua

La captación de agua se puede hacer mediante la construcción de bocatomas, estaciones de bombeo y pozos profundos. Las bocatomas son estructuras de contención, regulación y descarga de agua por gravedad. Las estaciones de bombeo son estructuras donde se instalan motobombas eléctricas o diesel para extraer agua de un cauce o embalse. Los pozos profundos constan de una perforación, tubería de revestimiento, filtros y motobomba, que sirven para explotar los acuíferos o formaciones geológicas donde se almacena agua subterránea.

Obras para almacenamiento de agua

De acuerdo con su capacidad de almacenamiento, pueden ser reservorios o embalses. Los primeros tienen una capacidad máxima de 10,000 m^3, mientras que los embalses se consideran de mayor capacidad.

Tanto los reservorios como los embalses permiten el manejo racional del agua de riego, ya que ésta se puede almacenar en horas de la noche, en los fines de semana y en las épocas lluviosas, para aumentar de esta manera los caudales durante las jornadas hábiles de riego, permitiendo un control más eficiente por parte de los operarios.

Para evitar las pérdidas de agua y la disminución de la capacidad de los reservorios debido a la infiltración, la sedimentación y la presencia de malezas, se recomienda su revestimiento y la construcción de obras auxiliares para el control de la sedimentación.

Reservorio. A continuación se incluye el cálculo de un reservorio con capacidad para regar un campo de 60 ha de caña de azúcar localizado en el valle geográfico del río Cauca:

Area a regar	:	60 ha
Frecuencia de riego	:	25 días
Período de riego	:	20 días
Area a regar por día	:	3 ha
Volumen/ha y por por día	:	5400 m^3 = volumen útil de embalse
Caudal disponible	:	125 lt/seg = 450 m^3/hora
Tiempo de llenado	:	12 horas (5400 m^3/450 m^3/hora)
Tiempo de evacuación	:	10 horas (tiempo de riego)
Caudal de evacuación	:	540 m^3/hora = 150 lt/seg
Diques:		
Altura total	:	1.80 m a criterio, de acuerdo con el área disponible y la topografía
Borde libre	:	0.20 m
Altura útil	:	1.60 m
Talud (Z)	:	1.5 a 1.0, de acuerdo con la estabilidad del suelo
Corona o cresta	:	3.0 m
Pata o base	:	(1.8 x 1.5) x 2 + 3 m, = 8.4 m
Area útil, promedio, ocupada por el reservorio	:	5400 m^3/1.60 m = 3375 m^2
Lado interno inferior	:	(3375m^2) elevado a la 0.5 = 58 m
Lado externo	:	58 m + 8.4 m x 2 = 74.8 m
Area total ocupada	:	$(74.8\ m)^2$ = 0.56 ha
Longitud de diques	:	74.8 m x 4 = 299.2 m
Volumen de diques	:	$\frac{(3 + 8.4\ m) \times 1.8\ m \times 299.2\ m}{(2 \times 0.8^a)} = 3837.24\ m^3$

a. = Valor de compactación.

Obras para la conducción de agua

Pueden ser canales abiertos o tuberías que conducen el agua por gravedad o a presión. Los canales pueden ser de riego o de drenaje, revestidos o no (en tierra), y se dividen en primarios, secundarios y terciarios. Deben tener una pendiente uniforme, tratando, en lo posible, que los cambios de ésta coincidan con el cruce de los callejones para aprovechar así los sifones de paso del agua por debajo de las vías.

Los canales en tierra deben tener una pendiente entre 0.05% y 0.1%, y su diseño se debe hacer con taludes 1:1 y una sección de mínima infiltración, mientras que los canales revestidos con concreto o suelo-cemento se deben diseñar con un criterio de máxima eficiencia hidráulica.

El control de malezas y el mantenimiento de los canales y sus obras complementarias se hace al menos cada 3 meses, antes del inicio de la temporada de riego (sequía) o de drenaje (lluvias).

Canales primarios. Normalmente conducen caudales mayores de 200 lt/seg, equivalentes a toda la fuente o descarga de agua. Se deben revestir con pasto argentina (*Cynodon* sp.); no obstante, los canales de riego, con capacidad superior a los 300 lt/seg y construidos sobre coronas, se deben revestir en concreto simple, suelo-cemento o plástico.

Canales secundarios. Son aquéllos que alimentan o drenan varias suertes y se originan o desembocan en un canal primario. Al igual que los canales primarios, se deben revestir con pasto argentina o suelo-cemento, dependiendo del caudal de agua que transporten.

Canales terciarios. Son canales internos de cada suerte y tienen dirección perpendicular a los surcos. Cuando sirven como acequia de riego están localizados en la parte alta y suministran el agua a los surcos, y cuando sirven para drenaje superficial se encuentran en el extremo inferior de éstos.

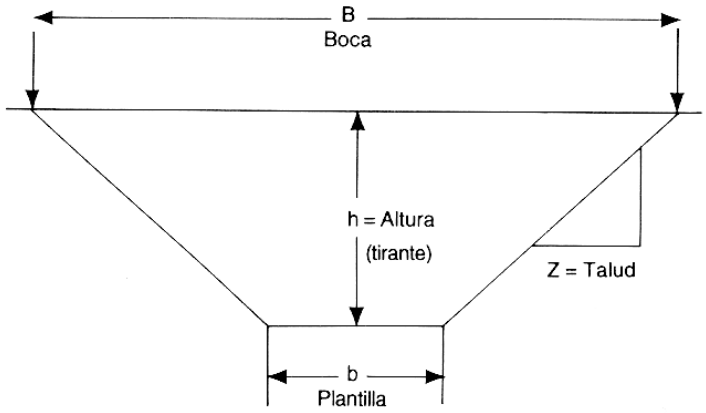
Los canales terciarios de drenaje tienen forma de batea y una profundidad de 0.15 m; los de riego deben tener una altura suficiente sobre el suelo que permita el uso de sifones para suministrar agua a los surcos. Para el acceso de los equipos de cosecha, los canales terciarios se deben tapar removiendo únicamente el suelo de los bordes, sin perturbar la base compactada, y su reconstrucción debe respetar los ejes originales para evitar que queden "caídos" hacia los callejones.

En la Figura 1 se muestran secciones típicas para canales de riego y drenaje.

Procedimiento para el diseño de canales

Para el diseño de canales de riego o de drenaje, se requiere información sobre el área a regar o drenar, caudales, clase de suelo y pendiente del terreno.

Este procedimiento comprende: (1) La identificación del canal en el plano general y su ubicación en el campo; el levantamiento altimétrico cada 20 m,



Tipo de canal	**Dimensiones en metros**: **B** (m)	**b** (m)	**h** (m)
De riego:			
Principales	3.4 - 4.2	0.6	1.4 - 1.8
Primarios	2.5 - 3.4	0.6	1.0 - 1.4
Secundarios	2.0 - 3.0	0.6	0.6 - 1.2
Terciarios	1.2 - 1.5	0.3	0.3 - 0.5
De drenaje:			
Primarios	4.0	0.6	2.0
Secundarios	3.0	0.6	1.3
Terciarios	1.5	0.0	0.2

Figura 1. *Secciones típicas para canales de riego y de drenaje.*

incluyendo detalles adicionales como curvas, obras civiles y cruce con otros canales. (2) El dibujo del perfil a una escala adecuada, que puede ser de 1:1000 ó 1:2000 en el eje horizontal, y de 1:50 ó 1:100 en el eje vertical. (3) El cálculo de la sección hidráulica, utilizando la fórmula de Manning (ASAE, 1980) para canales abiertos, con criterios de mínima infiltración cuando se construyen en tierra y de máxima eficiencia cuando se revisten.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} * S^{1/2}$$

donde:

V = velocidad del flujo de agua, en m/seg,
n = coeficiente de rugosidad de 0.025 a 0.030 en canales en tierra de acuerdo con el tipo de suelo

S = pendiente del canal,
R = radio hidráulico, en metros.

$$R = \frac{\text{Area de la sección } (m^2)}{\text{Perímetro mojado (m)}}$$

Area de la sección:

$$A = Q/V, \text{ en } m^2$$

donde:
Q = caudal, en l/seg, o en m^3/hora

Para canales en tierra la velocidad máxima permisible es de 0.6 m/seg.

La condición de mínima infiltración se obtiene cuando:

$$b/h = 4(\sqrt{(1+z^2)}-z)$$

donde :

b = plantilla del canal (m)

h = tirante (m)

z = talud

La máxima eficiencia se obtiene cuando se cumple la siguiente condición:

$$b/h = 2(\sqrt{(1+z^2)}-z)$$

Después de calcular la sección hidráulica se traza la razante o línea que indica la profundidad efectiva del canal, se determinan los cortes cada 20 m y, finalmente, se inicia la construcción en el campo.

Sistema de bombeo y conducción de agua por tubería

Cuando la fuente de agua se encuentra a una cota más baja que la del campo, es necesario instalar un sistema de bombeo, cuyo diseño requiere de información básica sobre condiciones agroclimáticas, módulo de riego, área a regar, caudal requerido, topografía, diferencia de niveles entre cotas de nivel de bombeo y de nivel de entrega final, y longitud de la línea de conducción entre los puntos de bombeo y de entrega final.

Para el diseño de estos sistemas, los criterios hidráulicos que se deben considerar son los siguientes: (1) velocidad en la succión menor de 2 m/seg; (2) carga de succión neta disponible (NPSHD), calculada según el sitio de bombeo, mayor que la carga de succión neta requerida (NPSHR) suministrada por el fabricante de la bomba; (3) velocidad de descarga menor de 3 m/seg; (4) velocidad mínima de 0.9 m/seg en tuberías (por efecto de la sedimentación); (5) tubería de succión lo más corta posible; (6) diámetro de la tubería de descarga menor o igual al diámetro de la tubería de succión; (7) reducciones excéntricas en la succión;

(8) ampliaciones concéntricas; y (9) para mayor seguridad es preferible utilizar bridas en lugar de abrazaderas.

Los cálculos incluyen el procedimiento siguiente:

1. Determinación de la carga estática de succión y descarga.
2. Selección de diámetros de succión y descarga de acuerdo con las velocidades recomendadas en cada caso.
3. Cálculo de pérdidas por fricción y accesorios, mediante la fórmula de Hazen-Williams.
4. Cálculo de la carga dinámica total (CDT).
5. Selección de diámetros y clases de tubería de conducción.
6. Selección de la bomba, utilizando las curvas características.
7. Cálculo de la potencia requerida en la bomba.
8. Cálculo de la cabeza de succión neta disponible (NPSHD) para el chequeo de la altura de succión.
9. Selección del motor.
10. Elaboración de presupuesto.
11. Estudio de otras alternativas (en los pasos 2 a 10).
12. Selección definitiva de los diámetros y las clases de tubería, bomba y motor.
13. Instalación del sistema en el campo.

Fórmula de Hazen-Williams para el cálculo de pérdidas de carga:

$$J = \left(\frac{Q}{0.2785\ C \times (D)^{2.63}} \right)^{1.85}$$

donde:

J = pérdida de carga por fricción, en m/m lineal de tubería
Q = caudal en m^3/seg
C = coeficiente de flujo (adimensional)
D = diámetro interno del tubo, en metros
0.2785 = constante de equivalencia de unidades.

Los promedios de los valores del coeficiente C para tuberías son los siguientes:

PVC	=	150
Asbesto-cemento	=	140

Hierro fundido nuevo	=	130
Hierro fundido usado	=	100
Concreto	=	130
Madera	=	120
Acero liso	=	120
Acero con remaches	=	100

Otra forma común de expresar la ecuación de Hazen-Williams es la siguiente:

$$V = 0.3547\ C(D)^{0.63} * (J)^{0.54}$$

donde:

C, D, y J	=	se definen como en la ecuación anterior
V	=	velocidad del agua, en m/seg.

Diseño de un sistema de bombeo y conducción de agua en tubería. A continuación se presenta un ejemplo sobre el procedimiento a seguir para el diseño de un sistema de bombeo y conducción de agua en tubería.

Características del sistema:

1. Módulo de riego = 2.20 lt/seg por ha.
2. Area a regar = 85.90 ha.
3. Caudal de agua requerido = 189.00 lt/seg.
4. Ubicación de la línea de conducción en el plano general de diseño.
5. Trazado de la línea en el campo.
6. Levantamiento altimétrico, cálculo y dibujo del perfil de la línea de conducción.
7. Longitud de conducción (L) = 2600 m.
8. El diámetro de la tubería de conducción se selecciona teniendo en cuenta que la velocidad del agua debe ser menor de 3 m/seg; en este caso es de 2 m/seg:

   $A = Q/V$

   $D = (4A/p)^{0.5}$

   Diámetro (D) = 14"

9. El cálculo de la carga dinámica total (CDT) se presenta a continuación:

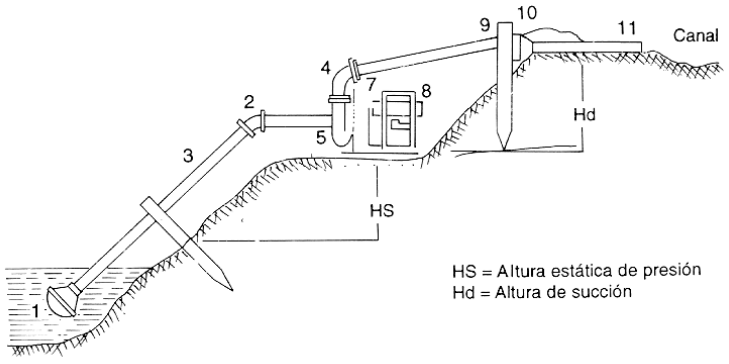
   $CDT = HS + HFS + Hd + HFD + HFC$ (Figura 2)

   donde:

   HS = Altura estática de succión, en este ejemplo HS = 2 m

   HFS = Pérdidas de energía en la succión (por accesorios)

   Hd = Altura de descarga



1	Válvula de pie o granada	7	Ampliación concéntrica
2	Codo de 45°	8	Válvula mariposa
3	Tubería metálica	9	Codo de 90°
4	Codo de 45°	10	Válvula cheque
5	Reducción excéntrica	11	Tubería de conducción
6	Bomba		

Figura 2. *Esquema de una instalación típica para el bombeo y conducción de agua en un cultivo de caña de azúcar.*

HFD = Pérdidas de la energía en la descarga (por accesorios), y

HFC = Pérdidas en la tubería de conducción.

10. Las pérdidas en la succión por accesorios (HFS):

$A = Q/V$

$D = (4A/p)^{0.5} = 16"$. (D = diámetro de la tubería de succión).

Se asume una velocidad del agua en la succión de 1.5 m/seg (debe ser inferior a 2 m/seg).

Pérdidas de energía en accesorios instalados en la succión:

Accesorios	Cantidad	Longitud equivalente en metros (Tablas)
Válvula de pie	1	100
Codo de 45°	2	5.9 x 2 = 11.8
Tubería (m)	4	4
Reducción excéntrica	1	35.7
Longitud equivalente total (m)		151.5

Pérdidas unitarias por fricción para tubería de 16" de diámetro en lámina (C = 100) y un caudal de 0.189 m^3/seg = 0.78 m/100 m.

Pérdidas por fricción en succión (HFS): 151.5 x 0.78/100 = 1.18 m.

Pérdidas de energía en la descarga por accesorios (HFD):

Diámetro de descarga (V < 3 m/seg) = 14" (0.36 m)

Accesorio	**Cantidad**	**Longitud equivalente en metros (Tablas)**
Ampliación concéntrica	1	32.0
Codo de 90°	1	10.5
Válvula mariposa	1	2.5
Metros de tubería	2	2.0
Válvula de cheque	1	45.0

Longitud equivalente total (m) 92.0

Pérdidas unitarias por fricción para tubería de 14" en lámina (C = 100) y un caudal de 0.189 m^3/seg = 1.49 m/100 m.

Pérdidas por fricción en descarga (HFD) = 92 x 1.49/100
= 1.37 m.

Altura de descarga (Hd):
Cota del eje de la bomba (m) = 925 - 2 = 923
Cota de la corona (m) = 930
Altura de descarga (Hd) (m) 7

Pérdidas por fricción en conducción (HFC):
Diámetro de conducción = 14" (0.36 m)
Longitud de conducción (m) = 1500
Pérdidas unitarias para Q de 0.189 m^3/seg = 0.80 m/100 m

Pérdidas de energía en conducción (HFC) en tubería de asbesto-cemento de 14" (C = 140) (m) = 12

CDT = 2 m + 1.18 m + 1.37 m + 7 m + 12 m = 23.55 m (24 m, aproximadamente).

11. Selección del diámetro y la clase de tubería de conducción:

Para CDT = 24 m (> 16 m) se requiere tubería de presión en asbesto-cemento con diámetro de 14" de clase 10. Para CDT < 16 m se puede usar tubería para alcantarillado.

La tubería de asbesto-cemento se clasifica según la presión de trabajo, bajo las normas ICONTEC 44, ISO R-160; y las uniones según la norma ICONTEC 487.

12. Selección de la bomba: A partir de las curvas características de las bombas, en función de la cabeza dinámica y del caudal, se obtienen las condiciones siguientes:

Eficiencia (%)	=	77
Potencia requerida (HP)	=	85
Velocidad (rpm)	=	1760
NPSHR requerida (m)	=	4.08

13. Verificación de la altura de succión:

NPSHR £ NPSHD	=	No hay cavitación
NPSHR	=	Cabeza de succión neta requerida, suministrada por el fabricante de la bomba.
NPSHD	=	Cabeza de succión neta disponible, calculada según las condiciones de bombeo.
NPSHD	=	PAT - PVAP - HS - HFS
PAT	=	Presión atmosférica a la altura del sitio de bombeo. Para 900 m.s.n.m., la PAT es de 9.3 m.
PVAP	=	Presión de vapor del agua. Para 20 °C, la PVAP es de 0.24 m.
HS	=	Altura de succión de 2 m .
HFS	=	Pérdidas por fricción en la succión equivalente a 1.18 m.
NPSHD	=	9.3 m - 0.24 m - 2 m - 1.18 m = 5.88 m.
NPSHD	=	5.88 m.
NPSHR	=	4.08 m.

O sea, que NPSHD en este ejemplo es mayor que NPSHR en 1.80 m; por consiguiente, se pude aumentar la altura de succión hasta 3.8 m.

14. Selección del motor. Los motores Diesel sufren una pérdida de potencia de 3% cada 300 m.s.n.m. y de 1% cada 5.6 °C a partir de 15.6 °C. Lo anterior indica que en las condiciones del valle geográfico del río Cauca se deben hacer correcciones de 9% por altura y de 3.5% por temperatura, o sea, un total de 12.5%.

En consecuencia, el motor requiere una potencia de 85 HP para la bomba, más 85 x 0.125 (11 HP) correspondientes a la corrección por temperatura y altura, para una potencia total requerida de 96 HP. Para motores eléctricos se debe adicionar 15% a 20% más de potencia.

Obras menores

Las obras menores son estructuras hidráulicas auxiliares que se utilizan en la red de riego y drenaje para recibir, entregar y controlar niveles y medir caudales; obviar accidentes del terreno o depresiones naturales; y proteger contra la erosión. Las obras menores más comunes se describen a continuación.

Aforadores. Son estructuras esenciales en toda red de riego, ya que permiten medir los caudales que transportan los canales o la tubería desde la fuente hasta los campos bajo riego. En canales abiertos los aforadores del tipo «RBC» son los más utilizados, por su bajo costo, facilidad de diseño, construcción, calibración y alta precisión.

Compuertas. Son estructuras localizadas en la salida de los reservorios o en los puntos de distribución de agua de un canal primario o secundario y entre éstos y los terciarios. Las compuertas más comunes son del tipo cuchilla, que tienen forma rectangular y movimiento vertical.

Compuertas de chapaleta. Se utilizan, generalmente, en los sitios en donde descarga por gravedad un colector de drenaje a un cauce; funcionan como una válvula cheque, o sea, que se abren cuando el flujo de agua tiene una dirección y se cierran cuando tiene sentido contrario. Se utilizan para evitar que el agua se devuelva de los cauces a los colectores.

Sifones invertidos. Son estructuras cerradas que trabajan a presión y se utilizan para el transporte del agua por debajo de depresiones, canales y vías. Se pueden construir en concreto o en metal y siempre se colocan por debajo del nivel de agua en el canal de riego.

El relleno con tierra sobre la tubería debe ser mayor de 0.6 m, para evitar daños por las cargas que producen los vehículos. Los sifones deben tener un diámetro superior a 61 cm (24") para facilitar su limpieza.

Alcantarillas. Al igual que los sifones invertidos, las alcantarillas son estructuras que permiten el paso de agua por debajo de vías, pero con la diferencia de que en éstas la tubería está al mismo nivel del agua en el canal de riego. En los sitios de paso de agua de riego que sirven sólo a uno o dos campos, se recomienda la construcción de alcantarillas protegidas con relleno de tierra o de un terraplén mayor de 0.6 m de espesor.

Viaductos. Son estructuras para la conducción de agua situadas por encima de las depresiones naturales o de los canales artificiales. Actualmente casi no se usan, debido a los problemas de mantenimiento y a los riesgos de obstaculización del flujo de agua en los cauces naturales cuando éstos aumentan su caudal.

Vías para el Transporte de la Caña

Las vías son estructuras civiles que se construyen para el paso en forma rápida y segura de los vehículos transportadores de caña. Se dividen en primarias, secundarias y terciarias.

Vías primarias o principales

Se utilizan para el tránsito de tractomulas y sistemas de "doble canasta". Su construcción se hace mediante el descapote previo del terreno, nivelación de la subrasante, relleno y compactación de la misma con material de afirmado, y pendiente transversal hacia uno o ambos lados de acuerdo con la localización de las obras de drenaje y riego. El ancho de la calzada es, normalmente, de 9 m más 1 m adicional desde el eje del canal de riego y una distancia igual desde la cuneta.

Vías secundarias

Forman los callejones que dividen las suertes, tienen doble vía para facilitar el tránsito de trenes cañeros y los sistemas de autovolteo hacia los patios de transbordo o bahías para el estacionamiento de las tractomulas. Generalmente se encuentran en la misma dirección del surco, y su construcción se hace en forma similar a la de las vías primarias. El ancho de la calzada es de 7 m y los ejes de los canales de riego y de drenaje son de 1 m cada uno.

Vías terciarias

Son callejones que dividen tablones dentro de una misma suerte y su dirección es perpendicular a los surcos que desembocan en una vía secundaria. Se construyen en suelos bien compactados con pendiente hacia la cuneta de drenaje. En lo posible, se deben revestir con pasto argentina. En estas vías el ancho de la calzada es de 4.50 m, más 1 m a partir del eje de la acequia de riego y 0.50 m de la cuneta de drenaje.

En las vías antes mencionadas, la pendiente transversal no debe exceder de 0.2%. Los callejones que poseen en ambos lados acequias regadoras se deben construir de tal forma que drenen por gravedad hacia ellas. Cada callejón terciario tiene, por lo general, un canal de riego a un lado y uno de drenaje al otro lado. En este caso, el canal de riego se debe construir 0.10 m por encima del eje de la vía. Cuando los canales tienen 1 m o más de profundidad y se encuentran aledaños a los callejones, el ancho de la calzada se debe aumentar en 1 m.

El mantenimiento de las vías se debe hacer en forma periódica mediante la limpieza de los canales laterales y la reposición de las vías primarias y secundarias con balasto.

Programación de las Labores para la Adecuación de Tierras

En general, a cada una de las labores de adecuación de tierras se le asigna un código arbitrario que depende del ingenio o de la hacienda, como se observa en el listado siguiente:

Código	**Labor**
1121	Limpieza de terrenos.
1122	Descepada.
1123	Rastrillada, posdescepada.
1124	Nivelación con «bulldozer».
1125	Nivelación con traíllas.
1126	Nivelación con marconivelador.
1127	Recuperación de tierras (áreas que por su condición no se usan para el cultivo de caña, pero es posible incorporarlas, por ejemplo: pantanos, zonas pedregosas).
1128	Limpieza y desbarre de canales.
1129	Construcción de canales.
1130	Construcción de coronas de riego.
1131	Construcción de reservorios.
1132	Instalación de tubería subterránea para riego.
1133	Instalación de tubería subterránea para drenaje.

Tipo de Maquinaria

La maquinaria que se utiliza para la adecuación de tierras también tiene un código arbitrario, como se detalla a continuación:

Código:	**Tipo de maquinaria**
01	Tractores con llantas, de 375 a 475 HP, equipados con doble traílla de 13.7 m^3 (18 yardas cúbicas). Rastras para descepada de 28 x 32" y 20 x 36", y de 56 x 24", 62 x 26", 87 x 26" y 92 x 26" para rastrillar.
02	Tractores de oruga de aplicación especial de 165 HP, equipados con rastras para descepada de 12 x 36" y 16 x 32", y "pata de cabra" para compactación de terrenos.
03	Tractores con llantas, de 165 HP, equipados con rastrillos 24 x 26", 28 x 26" y marconiveladores.
04	Tractores de oruga con cuchilla delantera.

05 Retroexcavadoras de orugas con capacidad entre 0.5 y 0.76 m^3, para la construcción, desbarre y limpieza de canales.

06 Tractores con llantas, entre 90 y 120 HP, utilizados para oficios varios (movilización de tanques con agua, transporte de algunos implementos).

07 Motoniveladoras.

08 Máquina entubadora para drenaje subterráneo.

09 Retroexcavadoras de 0.2 a 0.4 m^3 con cargador.

Eficiencia de la maquinaria

Es un índice del tiempo efectivo que necesita una máquina para desarrollar una determinada labor, por ejemplo: una eficiencia de 75% significa que de 12 horas empleadas para ejecutar una labor, sólo el 75% (9 horas) fueron efectivas.

Otros parámetros necesarios para programar las labores de adecuación

Entre éstos se pueden mencionar el rendimiento de la maquinaria, el tiempo efectivo y total disponible para cada labor, los días programados para cada labor y la maquinaria necesaria.

En el Cuadro 1 se presentan, como ejemplo, los valores de estos parámetros, y en la Figura 3 se muestra un cronograma de labores de adecuación de tierras.

Cuadro 2. **Programación de actividades para la adecuación de terrenos en el cultivo de la caña de azúcar.**

Labor	Máquina	Cantidad	Rendimiento (horas/unidad)	Hora-maq/ labor	horas/ día	Días/ labor	hora/ labor	No máquinas
1121	04	20 ha	6.0	120	18	4	72	2
1121	06	20 ha	2.0	60	18	4	72	1
1122	01	110 ha	1.5	165	18	5	90	2
1122	02	30 ha	3.0	90	18	5	90	1
1123	01	110 ha	1.2	132	18	4	72	2
1123	03	30 ha	3.2	96	18	2	36	3
1124	04	80 ha	12.0	960	18	12	216	5
1125	01	120 ha	3.0	360	18	12	216	2
1126	03	40 ha	1.2	48	18	3	54	1
1127	04	20 ha	3.5	700	18	10	180	4
1128	04	1600 ml	0.017	27	18	2	36	1
1128	05	1600 ml	0.025	40	18	2	36	1
1129	04	14000 m^3	0.033	462	18	10	180	3

(Continuación)

Cuadro 2. (Continuación)

Labor	Máquina	Cantidad	Rendimiento (horas/unidad)	Hora-maq/ labor	horas/ día	Días/ labor	hora/ labor	No máquinas
1129	05	14000 m^3	0.014	196	9	10	90	2
1130	01	2200 m^3	0.008	18	18	1	18	1
1130	02	2200 m^3	0.016	35	18	2	36	1
1130	04	2820 m^3	0.033	93	18	2	36	3
1130	05	620 m^3	0.014	9	9	1	9	1
1130	06	2200 m^3	0.010	22	18	2	36	1
1131	01	2836 m^3	0.020	57	18	3	54	1
1131	02	2836 m^3	0.020	57	18	3	54	1
1131	04	2836 m^3	0.050	142	18	3	54	3
1131	06	2836 m^3	0.020	57	18	3	54	1
1132	04	2960 ml	0.0017	5	9	0.6	5.4	1
1132	06	2960 ml	0.0500	148	9	18	162	1
1132	09	2960 ml	0.0330	198	9	11	99	1
1133	04	1800 ml	0.0017	3	9	0.4	3.6	1
1133	08	1800 ml	0.0160	29	9	32	29	1
1133	09	1800 ml	0.0160	29	9	32	29	1

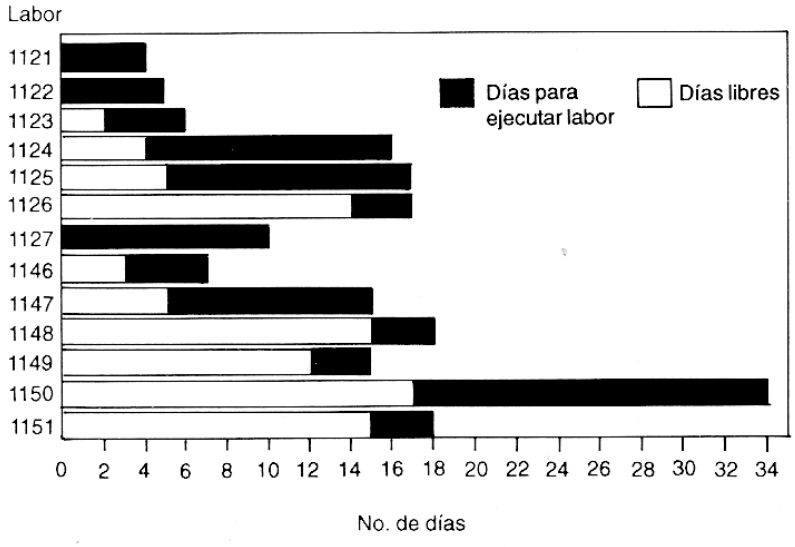


Figura 3. *Cronograma de labores de adecuación de tierras en el cultivo de la caña de azúcar.*

Costos de Adecuación de Terrenos

A manera de ejemplo, a continuación se incluye una matriz que puede servir a los cultivadores de caña del valle geográfico del río Cauca, para determinar los costos de adecuación de terrenos.

1. Topografía (levantamientos, cálculos, dibujos, diseños, planteos, chequeos) ($/ha) 18,000
2. Estudio detallado de suelos ($/ha) 14,000
3. Labores generales:

Labor (código)	Tipo de máquina	Rend. (horas/ha)	Costo ($/hora)	Costo total ($/ha)
1121	04	40	17,500	70,000
1121	06	20	11,200	22,400
1121	Jornal	40	996	3,980
1121	Total/ha			96,380
1122	01 (2 Pases)	15	27,000	40,500
1123	01 (4 Pases)	12	34,000	40,800
1124	04	60	17,500	105,000
1125	01	35	30,000	105,000
Total/ha (nivelación: bulldozer + traíllas)			210,000	

4. Obras de infraestructura (horas por metro lineal o cúbico, según el tipo de obra).

Labor	Tipo de máquina	Rendim. (hora/m)	Costo ($/hora)	Costo total
1128	04	0.017	17,500	297
1128	05	0.025	21,600	540
1128	Total	——	——	837
1129	05	0.033	17,500	578
1129	04	0.014	21,600	302
1129	Total	——	——	880
1130	01	0.008	30,000	240
1130	02	0.016	23,700	379
1130	04	0.033	17,500	577
1130	05	0.014	21,600	302
1130	06	0.020	11,200	224
1130	Subtotal	——	——	1722
1130	Enfalcado sección útil (concreto)			80,000
1130	Total	——	——	81,722
1131	01	0.02	30,000	600
1131	02	0.02	23,700	474
1131	04	0.05	17,500	875
1131	06	0.02	11,200	224
1131	Total dique	——	——	2173

a. El código 1128 se expresa en metros lineales. Los demás códigos se expresan en m^3.

1131	Obra civil de entrada y salida en concreto a todo costo ($/m^3)	=	102,000
1132	Promedio del costo por metro lineal, entregado e instalado, de tuberías de asbesto-cemento clase 6 entre 8" y 14" de diámetro, incluyendo accesorios ($)	=	15,270
1133	Promedio de costo por metro lineal, entregado e instalado. El valor del uso por hora de la máquina entubadora representa el 45% de este costo ($)	=	5940
1151	Costo del estudio freático ($/ha)	=	16,000
	Construcción de cada alcantarilla en callejones principales (a todo costo) ($)	=	1,100,000
	Construcción de cada alcantarilla de campo en callejones secundarios con cabezales de guadua (a todo costo)	=	120,000
	Conformación y balastaje de las vías principales y patios de transbordo ($/m^3)	=	3618

El último costo varía con la distancia entre la fuente de balasto y el lugar de la obra.
Los costos que aparecen en este capítulo corresponden a 1994. US$1 = 800 pesos colombianos

Referencia

ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 1980. Jensen, M. E. (ed.). Design and operation of farm irrigation systems.

cenicaña

Referencia bibliográfica

CRUZ, R.; LÓPEZ, O.M. Adecuación de tierras. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA, 1995. p.86-108.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LA CAÑA
DE AZÚCAR DE COLOMBIA - CENICAÑA
Estación Experiemental: vía Cali-Florida, km 26
Tel: (57) (2) 6648025 - Fax: (57) (2) 6641936
Dirección postal: Calle 58 norte no. 3BN-110
Cali, Valle del Cauca-Colombia

www.cenicana.org
buzon@cenicana.org