

# Modernización del distrito de riego más antiguo de México

Desde hace 4,600 millones de años tenemos la misma cantidad de agua en el planeta. El 72% del agua de la Tierra y el 76% del agua de México se usan en la agricultura, que no solo es el usuario más grande de este vital líquido sino también el que más desperdicia. Habiendo la misma cantidad de agua y cada vez más personas, no hay ningún escenario en el que haya suficiente agua (y alimentos) si no inventamos una agricultura más eficiente. Estos han sido algunos de los retos y aprendizajes para la modernización del distrito de riego más antiguo de México, ejemplo también para el mundo.

FRANCISCO X.

**VALDÉS  
SIMANCAS**

Ingeniero mecánico con especialidad en Mecánica de fluidos no compresibles.

Desarrollador de tecnologías, cuenta con 28 patentes de soluciones para la sustentabilidad.

**El Distrito de Riego 001** Pabellón de Arteaga fue el primero de México. Se inició en 1926 y en 1931 fue puesto en operación. Se creó para regar 11,800 ha desde la presa Plutarco Elías Calles en Aguascalientes, pero nunca se ha regado dicha superficie. Antes de su modernización se regaban, en promedio, 3,594 hectáreas.

El acuífero 0101 Valle de Aguascalientes, donde se encuentra el distrito de riego, está en veda desde 1963 y ha sufrido una sobreexplotación que gradualmente se ha incrementado hasta los 230 Mm<sup>3</sup>/año, acumulando un déficit estimado en 6,000 Mm<sup>3</sup> en 60 años. Esto ha hecho que en la actualidad se perforen pozos de hasta 600 m de profundidad y que 72 de los 230 pozos de la capital no cumplan con los límites permisibles de arsénico y flúor.

Para reducir este déficit, en el año 2005 se convocó para elaborar la ingeniería y construcción de la primera etapa de un sistema de riego para 6,100 ha regables de 11,800 ha dominadas con 32.5 hm<sup>3</sup> de la presa Calles y una eficiencia mínima del 76% en beneficio de 2,439 usuarios y parcelas.

## Propuesta y retos autoimpuestos

La propuesta y el proceso de diseño incluyó ciertos retos.

*No usar bombeo.* La presa tiene una cota en el nivel de aguas mínimo (NAMINO) de 1,993.25 msnm y un nivel de aguas máximo (NAM) de 2,019.72 msnm. Considerando que hay parcelas en el distrito hasta en la cota 1,890 y que la línea principal se diseñó hasta para un flujo de 7 m<sup>3</sup>/s,

entubando desde la cortina la topografía regalaba una “bomba” de hasta 15,000 hp instantáneos de energía completamente verde que no se podía desperdiciar.

*Alta confiabilidad y riego a demanda.* Desde la conceptualización se previó que los productores tuvieran, primero, confiabilidad en el suministro de agua para no comprometer los futuros cultivos de alto valor, y segundo, adaptabilidad para diferentes tipos de cultivos que pudieran establecer y las horas de riego y fertilización. Para esto era necesario un sistema robusto y flexible.

*Lograr la mayor eficiencia de un distrito de riego de este tipo en el mundo.* La eficiencia global de riego reportada en México era del 32%, es decir, entre conducción, distribución y aplicación se perdían 68 de cada 100 litros de agua. Las dependencias solicitaban una eficiencia global de 76% considerando lo que se asumía como el máximo práctico de eficiencia. Sin embargo, se propuso un sistema con una eficiencia de conducción del 98%, aplicación del 95% y global de ~93%, utilizando exclusivamente fertirriego por goteo. Este era un reto enorme para productores de 2.5 ha, el 65% de los cuales eran mayores de 65 años y con hábitos muy arraigados.

*Cambiar la vida a los productores y poner una muestra para México y el mundo.* En el campo se encuentra la gente con mayores rezagos económicos del mundo. En este proyecto, la meta era hacer algo que fuera contundentemente exitoso en ahorro de agua, productividad y generación de riqueza para los productores: un ejemplo para otras áreas de alto estrés hídrico del país y el mundo.

### Soluciones

En el proceso de aprobación de las ingenierías y la ejecución del proyecto que se autorizó participaron la Comisión Nacional del Agua y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; por Aguascalientes, las secretarías de Obras Públicas, Agricultura y Contraloría; y, por supuesto, la Asociación de Usuarios.

Para lograr la eficiencia en el uso del agua y la energía era inevitable entubar la totalidad de las conducciones, desde la presa hasta cada una de las parcelas, y utilizar únicamente riego por goteo. Esto implicó grandes retos técnicos y requirió soluciones innovadoras y difíciles de consensuar. Hubo temas cuya discusión duró meses, y cuando el grupo no llegaba a una conclusión se requirió la opinión/arbitraje de expertos del extranjero para resolver los *impasses* (véase figura 1).

### Tramo muerto

Saliendo de la cortina de la presa se encuentra una estrecha cañada de más de 100 m de alto y pendientes de hasta 80°. Tras evaluar todas las alternativas para colocar la tubería, la más conveniente y segura (por los frecuentes caídos de la escarpada cañada) fue instalarla enterrada bajo el cauce. Esta labor fue muy compleja, pero se hizo posible mediante la construcción de diques secos, lo cual se hizo a lo largo de más de 1.5 km (véase figura 2). A partir de ese punto hubo que salirse a la margen derecha, puesto que si se quería operar el sistema con la carga piezométrica de la presa no podía rebasarse en ningún momento la cota 1,960 msnm, y en la margen izquierda existían más de 20 casas construidas que lo impedían.

### Cruces subacuáticos

Al tomar la margen derecha debía cruzarse el cauce en dos puntos, y para no perder la carga debía hacerse por tubos. El primero de los cruces fue en la denominada Cañada del Brujo, de 150 m, y el segundo en la presa derivadora El Jocoque, de 300 m, con una profundidad cercana a los 50 m.

La opción convencional para esos cruces era construir puentes, pero esto significaba gastos de capital (capex) y operativos (opex) mucho más altos, además del impacto visual y en la navegación del vaso que esto implicaba. La alternativa innovadora propuesta fue usar polietileno de alta densidad (PEAD) con unos lastres de concreto; con el tubo vacío flotaban para su fácil manipulación sobre el trazo del cruce, y a medida que se llenaban, se sentaban sobre el lecho del cauce sin necesidad de hacer labores bajo el agua (véase figura 3). Esta solución fue polémica porque nunca se había implementado en México, y había poca experiencia en conducciones presurizadas submarinas en PEAD en el mundo, pero el diseño incorporaba todos los elementos para asegurar que funcionara, incluyendo cuatro válvulas reguladoras de presión de 32" para control de la presión en el PEAD y protección de la infraestructura hidráulica

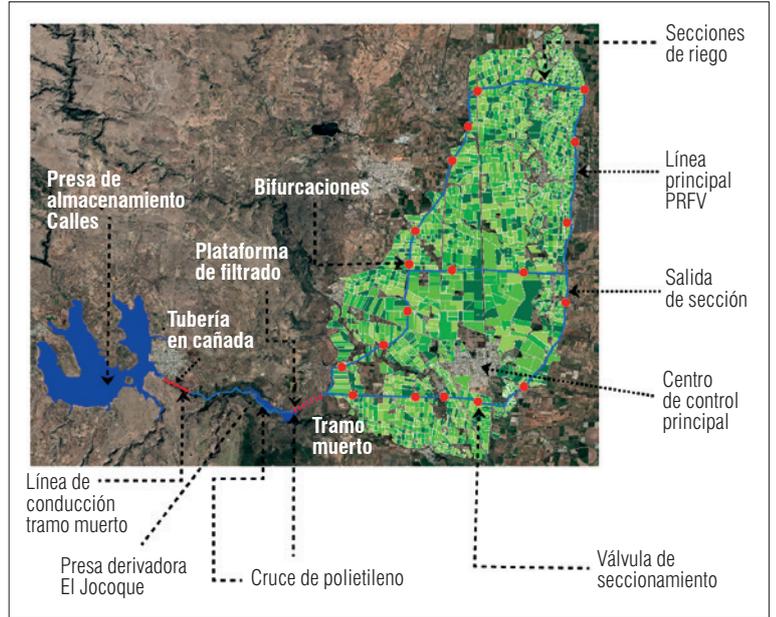


Figura 1. Plano general de presa, tramo muerto y distrito de riego.



Figura 2. Imagen de tramo de tubo en cañada y detalle de la excavación. A la derecha de la excavadora se ve el muro prácticamente vertical que bordeaba el angosto cauce. Tuvieron que hacerse pequeñas represas provisionales en pares entubando el agua de la represa aguas arriba hasta un punto después de la represa aguas abajo para que se pudiera excavar y enterrar el tubo sin que se inundara la zanja.



Figura 3. Colocación de cruces de polietileno.

aguas abajo, que opera únicamente cuando el nivel de la presa se encuentra arriba de la cota 2,010 msnm.

### Filtrado

El punto más polémico del proyecto fue, sin lugar a duda, el filtrado. Se propuso un filtro principal para retener todos los sólidos mayores de 80  $\mu\text{m}$ , acompañado de un filtro de seguridad de 100  $\mu\text{m}$  que estaría en cada parcela, el cual permite el paso libre del agua, y solo trabaja en caso de algún desperfecto en el sistema principal o de intrusión de sólidos aguas abajo. Esta dupla permitiría entregar a cada productor agua presurizada y apta para cualquier sistema de goteo.

Considerando que el agua proviene de presa, con flora y fauna acuática, además de algunos escurrimientos pluviales y residuales, tratados o crudos de poblaciones aguas arriba, era de esperarse que tuviera desde pequeños peces hasta alguna cantidad de carga orgánica. Se propuso media granular filtrante (MGF) para el filtrado primario y no se aceptó ningún otro tipo de sistema de mallas o discos, debido a que, según la experiencia, estos presentan problemas en la medida en que haya cargas orgánicas considerables en aguas superficiales. El filtrado de seguridad, dado que no trabaja de manera ordinaria, sí se propuso con discos. La propuesta no se aprobó hasta que un tercero de reconocido trayecto falló a favor de esta solución.

Para no contabilizar el agua de retrolavado de los filtros de MGF como pérdida, se forzó a que la plataforma de filtrado estuviera en el vaso de la presa derivadora El Jocoque, de manera que se aprovechara como gasto ecológico. Para este propósito, la plataforma se tuvo

que colocar en una losa que se coló soportándola en múltiples columnas sobre el vaso (véase figura 4).

### Presurizado en túnel

Otro escollo técnico a sortear para preservar la presión fue el de conducir el agua por un túnel construido hace un siglo, de aproximadamente 3 m de diámetro y 1.4 km de largo.

Se contemplaron varias opciones, y la finalmente escogida fue la de entubar dentro del túnel. Esto conllevó retos importantes, puesto que el tubo tendría que ir de forma aérea, y el sistema debía funcionar cuando el tubo estuviera conduciendo el agua por dentro para el riego presurizado, y por el túnel, fuera del tubo, cuando las parcelas se siguieran regando por gravedad mientras el riego tecnificado se concluía.

Se diseñó una silleta multipropósito colocada cada 6 m de distancia y cargada hacia uno de los lados del túnel, las cuales soportarían el tubo en su forma final pero también servirían para soportar unos rodillos que permitieran que el tubo fuera deslizado desde un extremo del túnel hasta su punto de colocación (véase figura 5).

### Diseño hidráulico

A la par de los retos constructivos se trabajó el diseño hidráulico. Este se forzó para que funcionara aun en el tiempo de mayor demanda del cultivo al flujo mínimo requerido de 3,840 l/s con un esquema de tandeo riguroso, y esto con la presa al NAMINO, es decir, 1,993.25 msnm (véase figura 6).

También, cuando se tuvieran niveles más altos de carga disponible en el vaso, se podría regar a demanda libre con hasta 7,000 l/s de flujo máximo. El inicio a las parcelas se encontraba en la cota 1,934 msnm, a más de 9 km de la cortina, y las parcelas más complicadas, por su altura de 1,930 msnm, estaban a más de 40 km tubo abajo



Figura 4. Plataforma de filtrado.



Figura 5. Entubado en el túnel.

de la presa. Es decir, se contaba con aproximadamente 60 mca (metros columna de agua) o  $\sim 6 \text{ kg/cm}^2$  para llegar a cada parcela y entregar  $2.5 \text{ kg/cm}^2$  necesarios para el correcto funcionamiento del hidrante parcelario y el goteo, lo cual dejaba  $\sim 3.5 \text{ kg/cm}^2$  para la conducción, filtrado, seccionamiento y control de las tuberías del tramo muerto, principales y secundarias.

Por último, como resultado de que el distrito se diseñó tanto para cultivos básicos como para hortalizas de alto valor, el sistema tenía que ser muy confiable, resiliente y tolerante a fallas. Esto fue un reto mayor que demandó el análisis de muchas opciones y sus respectivos cálculos hechos con algoritmos propietarios. El resultado final fue una red de doble anillo con redundancia y múltiples puntos de seccionamiento para poder dar mantenimiento afectando al menor número de productores posible.

### Administración de riego de precisión

Aun con todo lo anterior resuelto, por eficiente que fuera el sistema, si se aplicaba una lámina del doble de lo que la planta requiere se reduciría un 50% la eficiencia global.

Si se aspiraba a tener eficiencias globales del 93%, esto significaba que debía haber eficiencia de conducción del 98% y eficiencia de aplicación del 95%. Para lograr esto se instalaron sistemas de medición volumétricos e instantáneos con monitoreo en tiempo real y redundancia en el tramo muerto, en las líneas principales y en las salidas a sección, y medidores volumétricos en cada una de las 2,439 parcelas que componían el distrito, de manera que las fugas fueran detectadas en tiempo real cuando las entradas y salidas totales de un tramo presentaban diferencias.

La parte que probaría ser más retadora sería la de mantener eficiencias de aplicación del 95%, lo cual requeriría cuatro condiciones:

1. La totalidad de las parcelas tendría que ser regada con riego por goteo.
2. El coeficiente de uniformidad de la cinta tendría que ser del orden del 98%.
3. Las láminas de riego tendrían que calcularse de manera personalizada y con una precisión sin precedentes en el 2005 para este tipo de proyectos. Para estos fines se desarrolló un *software* que calculaba para cada bloque de cada productor las láminas a aplicar utilizando información de suelo, planta, clima.
4. Considerando que se buscaría regar la mayor parte de las veces durante la noche y no había margen para el error humano, el riego debía ser aplicado de forma automática y por volumen, no por tiempo.

Para lograr lo anterior fue necesario el desarrollo de un *software* para realizar los cálculos y un dispositivo que los ejecutara, con el reto adicional de que menos del 10% de las parcelas contaban con energía eléctrica (véase figura 7).

### Hidrante parcelario inteligente

Este dispositivo obtuvo su patente en el año 2006, con patentes complementarias en 2012, 2014 y una última en 2023; los algoritmos y sistemas de comunicación y control se siguen mejorando de manera continua y hoy en día ha surgido una versión que no habría sido posible en 2005.

El hidrante parcelario inteligente (HPI) realiza la totalidad de las funciones de un sistema de riego por goteo,

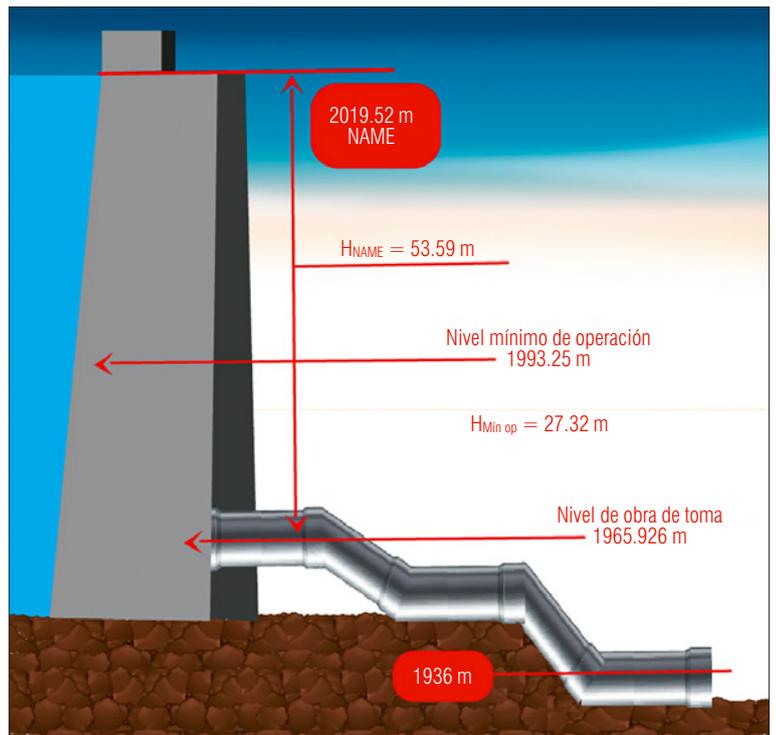


Figura 6. Cotas de funcionamiento de la presa y el distrito.



Figura 7. Hidrante parcelario inteligente.

► Como resultado de que el distrito se diseñó tanto para cultivos básicos como para hortalizas de alto valor, el sistema tenía que ser muy confiable, resiliente y tolerante a fallas. Esto fue un reto mayor que demandó el análisis de muchas opciones y sus respectivos cálculos hechos con algoritmos propietarios. El resultado final fue una red de doble anillo con redundancia y múltiples puntos de seccionamiento para poder dar mantenimiento afectando al menor número de productores posible.

con excepción de la conducción dentro de la parcela y la manguera de goteo. Funciona exclusivamente con la energía hidráulica del agua y un control propietario que hoy en día se comunica por un protocolo de radio tipo mesh de 900 MHz abastecido por unas baterías de litio recargables y un pequeño panel solar.

Es un gabinete de dos compartimientos, uno para los administradores y otro para el usuario, que está protegido de la intemperie y el vandalismo. Cuenta con válvula de mantenimiento para los administradores; permite la medición y control de flujo instantáneo y volumétrico bajo un esquema de prepago.

Posee también ventosas para admisión/expulsión de aire aguas arriba del hidrante; una válvula reguladora de presión para suprimir picos y sostenedora para mantener las líneas de alimentación llenas en casos de cortes para servicio.

Cuenta también con inyección de fertilizante tipo tobera Venturi, válvula de servicio para el usuario, filtro de seguridad de 100  $\mu$ m, válvulas de apertura/cierre y regulación de presión para cada una de las secciones de riego y ventosas para admisión/expulsión de aire de la sección de riego.

El control trabaja en combinación con el software para dosificar en tiempo y cantidad el volumen preciso de agua y fertilizante que requiere el cultivo.

### Resultados

En su totalidad, existen 63.5 km de tubería de políéster reforzado de fibra de vidrio, polietileno de alta densidad y un poco de acero en líneas principales, así como 414 km de PVC en líneas secundarias. Adicionalmente, el distrito tendrá suficiente manguera o cinta de goteo para darle poco más de una vuelta al mundo (~50,000 km). Están operando 16 de las 19 secciones y se pretende terminar las tres últimas en este 2023.

No se utiliza bombeo ni energía suplementaria, se aplica fertilizante y riego con muy alta precisión y se tiene una eficiencia global de ~93%. Se utilizan en promedio 4,300 m<sup>3</sup>/ha de agua, cuando anteriormente se usaban 13,780 m<sup>3</sup>/ha. Además de la reducción en el uso de agua, la productividad por unidad de superficie de algunos cultivos, como el maíz, ha aumentado hasta en un 300%.

Los aumentos en productividad y eficiencia, aunados a la reconversión de granos por hortalizas de más valor, proyectan la productividad del distrito de 87 millones de pesos en el año 2005 a más de 3,000 millones una vez terminado, con la generación de hasta 12,000 empleos.

### Aprendizajes y recomendaciones

Un proyecto innovador encontrará una resistencia proporcional a lo disruptivo que sea el cambio. Es preciso atender las preocupaciones de terceros y analizarlas, pero si lo originalmente propuesto se sostiene, también hay que tener la convicción y firmeza para defenderlo e implementarlo correctamente. Finalmente, quienes emprendan el tortuoso camino de ser agentes de cambio deben tener presentes algunas ideas:

- Si algo no se ha hecho antes, no significa que no se puede hacer.
- La ingeniería no debe circunscribirse a calcular sistemas con base en modelos y fórmulas preestablecidas; como sus raíces etimológicas lo dicen, deben ingeniarse nuevas y mejores formas de hacer las cosas cuando las existentes no son suficientes.
- La solución del agua para México y el mundo empieza y termina en la agricultura. Empieza con un uso eficiente del usuario más grande y con más oportunidad de mejora, recuperación responsable de aguas residuales y su reúso estratégico en el riego agrícola.
- El agua más económica, más verde, más sustentable y más socialmente justa es la que se puede liberar ayudando a los agricultores.
- No debemos resolver nuestro presente a través de dilapidar el futuro. Cualquier solución no basada en la sustentabilidad es un robo a las siguientes generaciones 

 ¿Desea opinar o cuenta con mayor información sobre este tema? Escribanos a [helios@heliosmx.org](mailto:helios@heliosmx.org)