



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**USO EFICIENTE DEL AGUA SUPERFICIAL DISPONIBLE EN EL DISTRITO DE
RIEGO 061 DE ZAMORA, MICHOACÁN ANTE EL INMINENTE CAMBIO
CLIMÁTICO.**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**PRESENTA
MARIO ALBERTO MARISCAL OCHOA**

**ASESOR
DR. BENJAMÍN LARA LEDESMA**

MORELIA, MICHOACAN, JULIO DE 2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres: Mario Mariscal Rivera y Guadalupe Ochoa Hurenda, por guiarme y siempre apoyarme en cada decisión que he decidido tomar, por empujarme a siempre ser y hacer más, por darme su calidez y confianza, y por enseñarme el valor del esfuerzo y del trabajo, que han sido pilar fundamental en la realización de este trabajo de tesis.

A mis hermanos: Alejandro Mariscal Ochoa y Susana Mariscal Ochoa, por su apoyo incondicional, por su amistad y confianza.

A mi abuelo: Ramón Ochoa Martínez, por enseñarme el valor de la solidaridad, la humildad y la nobleza, por demostrarme que la familia es lo más importante que tenemos, y por enseñarme a ser feliz y agradecido a pesar de la adversidad. Que en paz descanses.

Agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a la Facultad de Ingeniería Civil, la casa de estudios que me ofreció sus aulas durante cinco años; así como el departamento de hidráulica, donde desarrollé mi vocación.

A mis profesores, que gracias a su apoyo y su pasión por la docencia me ha sido posible llegar a este importante momento en mi vida.

Agradezco también a mis compañeros de licenciatura, con los cuales he creado fuertes lazos de amistad y que estoy seguro más de alguna vez estaremos colaborando en el campo laboral para desarrollar infraestructura de calidad para los mexicanos.

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
DEFINICIONES DE SISTEMAS DE RIEGO.....	6
INTRODUCCIÓN.....	8
ANTECEDENTES: EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA ESCASEZ DE AGUA.....	9
JUSTIFICACIÓN.....	11
OBJETIVO.....	12
EL DISTRITO DE RIEGO 061 DE ZAMORA.....	12
FUNCIONAMIENTO DE UNA PRESA DERIVADORA.....	16
PRESAS DERIVADORAS EN EL DISTRITO DE RIEGO 061.....	18
METODOLOGÍA.....	20
RESULTADOS.....	33
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40
BIBLIOGRAFÍA.....	41
ANEXOS.....	42

RESUMEN

La agricultura es una de las actividades económicas más importantes en el país. En Michoacán, aproximadamente el 11% de su economía depende del sector agrícola primario en términos del PIB, a la vez que la propia agricultura detona otros sectores económicos relacionados con agroindustria, transporte y comercio, sobre todo la agricultura de exportación.

El uso sustentable y aprovechamiento de los recursos hídricos es una característica de la cual carece la gran mayoría de las técnicas de riego que se practican en México. Como consecuencia del auge económico de la agricultura, se tiene una explotación desmedida del agua con la que se cuenta en los Distritos de Riego del país, y aunado a las sequías constantes que se presentan debido al aceleramiento del cambio climático potenciado por la actividad humana, se ha vuelto necesario corregir estas deficiencias implementando infraestructura hidráulica, que ayude a alcanzar el aprovechamiento óptimo de los recursos.

En el Distrito de riego 061 de Zamora, cada vez se hace más difícil conseguir el agua necesaria para los cultivos en temporada de estiaje. Es por ello que, debido a la necesidad de aumentar las aportaciones de agua superficial para el riego parcelario (1 m³/s) en los módulos III y IV del distrito de riego 061 de Zamora, Michoacán; se ha desarrollado una propuesta de presa derivadora, con la cual se podrá llevar el caudal necesario a la zona afectada, a través del racionamiento del recurso con el que ya se cuenta, para hacer más eficiente su aprovechamiento, y brindando así la solución a esta problemática.

Como parte del diseño hidráulico de esta obra de ingeniería, se calcularon: Las dimensiones y carga mínima de ahogamiento de la obra de toma, la sección transversal, longitud y pendiente en el canal derivador con base en la topografía del terreno, las dimensiones y longitud mínima en el canal desarenador con base en el tipo de sedimentos que se presenta en la zona, el perfil del cimacio vertedor y su longitud mínima de revestimiento para el salto hidráulico producido al pie del cimacio.

PALABRAS CLAVE:

Infraestructura hidráulica, sequía, sistema de riego, agricultura, ingeniería sustentable.

ABSTRACT

Agriculture is one of the most important economic activities in the country. In Michoacán, approximately 11% of its economy depends on the primary agricultural sector in terms of GDP, while agriculture itself triggers other economic sectors related to agroindustry, transportation and trade, especially export agriculture.

The sustainable use and exploitation of water resources is a characteristic that the vast majority of irrigation techniques practiced in Mexico lack. As a consequence of the economic boom in agriculture, there is an excessive exploitation of water that is available in the Irrigation Districts of the country, and in addition to the constant droughts that occur due to the acceleration of climate change triggered by human activity, It has become necessary to correct these deficiencies by implementing hydraulic infrastructure, which helps to achieve optimal use of resources.

In the Irrigation District 061 of Zamora, it is becoming increasingly difficult to obtain the necessary water for crops in the dry season. That is why, due to the need to increase the contributions of surface water for parcel irrigation ($1 \text{ m}^3 / \text{s}$) in modules III and IV of the irrigation district 061 of Zamora, Michoacán; A diversion dam proposal has been developed, with which the necessary flow can be brought to the affected area, through the rationing of the resource that is already available, to make its use more efficient, and thus providing the solution to this problematic.

As part of the hydraulic design of this engineering work, the following were calculated: The dimensions and minimum drowning load of the intake work, the cross section, length and slope in the diversion channel based on the topography of the land, the dimensions and length minimum in the desander channel based on the type of sediment that occurs in the area, the profile of the spillway and its minimum length of lining for the hydraulic leap produced at the foot of the topple.

KEYWORDS.

Hydraulic infrastructure, drought, irrigation system, agriculture, sustainable engineering.

DEFINICIONES DE SISTEMAS DE RIEGO

Aguas superficiales

Las aguas superficiales son aquellas que escurren por la superficie terrestre, surgiendo por medio de precipitaciones o por el afloramiento de aguas subterráneas. Suelen clasificarse como lóaticas, lénticas.

Las aguas superficiales lóaticas son aquellas corrientes de agua que se mueven siempre en la dirección del camino que opone menor resistencia como es el caso de ríos, arroyos, manantiales y riachuelos.

Las aguas superficiales lénticas son las que permanecen quietas o estancadas en la superficie terrestre, como es el caso de lagos, lagunas, humedales y pantanos.

Gasto

El gasto es la unidad de medida de un flujo; y puede definirse como el volumen de agua que es conducido por un área transversal en un determinado tiempo (segundo).

Cauce

El cauce es el conducto por el cual escurre cualquier corriente de agua, independientemente del uso que se le dé.

Canal

Un canal es un conducto artificial por el cual el agua es conducida para ser distribuida a una zona en específico.

Cultivo

Puede entenderse como cultivo el proceso de sembrar semillas y trabajar la tierra para obtener frutos de ellas. Para que un cultivo tenga éxito debe considerarse su ciclo vegetativo, que está directamente relacionado con las estaciones del año.

Los ciclos vegetativos son cuatro: Perenne (su ciclo vegetativo se extiende más allá de los doce meses), anual o cíclico (su ciclo vegetativo es menor a doce meses y requieren de una nueva siembra para la obtención de cosecha), bienal (su cosecha tarda dos ciclos) y temporal (depende de las condiciones climatológicas y edafológicas).

Sistema de riego

Un sistema de riego consiste en un arreglo sistemático de tuberías e infraestructura empleada para que el agua llegue a la zona de las raíces de los cultivos en una parcela, a fin de lograr el mayor rendimiento en la producción agrícola.

Los métodos de riego pueden ser por gravedad a través de surcos, inundación o “a manto” y corrugación”; por medio de aspersores mecanizados a fin de simular la lluvia en las parcelas y de forma subterránea por medio de tubería enterrada.

Distrito de riego

Los distritos de riego consisten en la entrega de la administración parcial del agua disponible a los agricultores por parte de la CONAGUA, no obstante se sigue conservando la infraestructura importante como las presas bajo la administración del Estado.

Módulo de riego

Los módulos de riego son divisiones que se desprenden de un distrito de riego, y que ayudan a facilitar la administración de los recursos a través de la sectorización. Los módulos de riego pueden considerarse niveles organizativos.

Compuerta

Una compuerta es una estructura de control en una obra hidráulica, que tiene como función regular el caudal que ingresa a una tubería, canal o presa.

Pendiente

Una pendiente es una inclinación de un elemento respecto a su horizonte, y topográficamente puede observarse como el desnivel que existe en el terreno respecto a una línea horizontal imaginaria.

Sifón

Hidráulicamente, un sifón es una estructura en forma de “n” que tiene la función de trasvasar un líquido de un sitio a otro, ascendiendo por el conducto a una altura mayor a la superficie del espejo de agua del sitio de origen y descendiendo por medio del extremo de salida del conducto.

Para que esta estructura funcione, es necesario asegurarse que el conducto en todo momento se encuentre lleno del líquido.

Sifón invertido

Un sifón invertido trabaja de la misma forma que un sifón convencional, con la peculiaridad que la forma del conducto ya no se asemejará a una “n”, sino a una “u”.

INTRODUCCIÓN

Profundizando en el concepto de cambio, puede entenderse esta palabra como una variación evolutiva de algún elemento, provocando que la versión actual sea distinta a su versión pasada en mayor o menor medida.

El cambio es una constante presente en el proceso de nuestra formación y del entorno que nos rodea. En el transcurso de nuestra vida pasamos por distintas etapas que fueron influenciadas por nuestras decisiones, trabajo, estilo de vida y de las personas que nos rodean a lo largo de nuestro paso por la Tierra; que de alguna u otra forma, cada día nos hace ser distintos a la persona que fuimos en el pasado.

Como no podría ser de otra forma, el planeta en el que habitamos también se encuentra en un constante cambio, ya que a lo largo de los millones de años de existencia de la Tierra han ocurrido sucesos remarcables en su historia climatológica que nos han hecho evolucionar como especie para poder adaptarnos a su habitabilidad.

Hasta este punto se ha dejado en claro que el cambio es un elemento natural y presente en todo lo que nos rodea, y que el resultado final estará influenciado por distintos factores externos. En el caso del cambio climático, el factor principal responsable del aumento global de la temperatura es la actividad humana.

Con la industrialización y globalización, el ser humano se ha encargado de acelerar la evolución climatológica de la Tierra como consecuencia de la explotación de recursos naturales de una forma insostenible; provocando con ello un desequilibrio ecológico que se ha manifestado alrededor del mundo a través de inundaciones, sequías, y otros fenómenos naturales extremos que ponen en peligro la vida en la Tierra.

Actualmente, en el Distrito de riego 061 de Zamora, encontrar agua para el riego de parcelas se ha vuelto un problema recurrente en tiempos de estiaje. Al no contar con el recurso suficiente para el riego, la producción de los cultivos disminuye, afectando a la economía regional gravemente.

A lo largo de este proyecto de tesis, se desarrollará con más detalle el problema que representa el cambio climático y el desabasto de agua para la agricultura de Zamora y la economía de sus ciudadanos; con la finalidad de aportar una propuesta que permita aprovechar el agua superficial con la que cuenta el Distrito de riego 061 eficientemente.

ANTECEDENTES: EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA ESCASEZ DE AGUA.

La evidencia nos dice que el cambio climático ha estado presente desde la formación misma del planeta, por lo que es algo natural e inminente. Cuando las condiciones del ecosistema que habitaba el ser humano se volvieron aptas para adoptar una vida sedentaria, se hizo necesario establecer colonias y desarrollar tecnología para poder subsistir como civilización.

Para poder sobrevivir, fue necesario hacer uso de los recursos naturales que se tenían a la mano, con los cuales fue posible desarrollar maquinaria y tecnología que tenían el fin de facilitar y potenciar las actividades cotidianas y de comercio, con lo que se logró un progreso exponencial en el conocimiento; a costa de una pérdida considerable del ecosistema que nos rodea.

Con la revolución industrial se logró la cúspide en el desarrollo de la tecnología para el ser humano, y con ello la globalización del comercio y del conocimiento. Sin embargo, también nos trajo una variación considerable en la temperatura global en cuanto a la intensidad y velocidad, en intervalos de tiempo mucho menores a los que se esperaría de acuerdo a los antecedentes evolutivos de la Tierra; esto debido a la actividad humana como potenciador, al utilizar por mucho tiempo tecnología y maquinaria poco sostenible; y en un aspecto social, al adoptar un sistema económico capitalista de gran consumo.

De acuerdo con lo publicado en el artículo El impacto social del Cambio Climático, “El ritmo de aumento de gases de efecto invernadero no tiene precedentes en, al menos, 20,000 años. Aun parando hoy de emitir esos gases tardaría la atmósfera centenares de años en volver a niveles previos a la industrialización.”...”Como resultado de ello, la temperatura global de la Tierra ha aumentado 0.7°C en el último siglo, y se asume como bastante inevitable un incremento de 2°C al final del siglo actual”...”este aumento de temperatura significa un aumento considerable de episodios catastróficos como huracanes, inundaciones, sequías y aumentos del nivel del mar” (Pardo Buendía, 2007).

Partiendo del concepto de cambio climático como una variante en los patrones y la severidad con que se presentan fenómenos climatológicos extremos, potenciados por la actividad humana; podemos analizar las consecuencias que trae consigo, para posteriormente proponer soluciones que ayuden a disminuir el impacto de nuestra presencia en el mundo.

Es imposible predecir con exactitud las consecuencias que genera el cambio climático en el planeta, debido a que la respuesta de la vida en la Tierra será tan variada como los ecosistemas existentes. No obstante, con base en observación y experimentación se tiene conocimiento de la reacción que existe en la naturaleza. En el artículo Cambio climático mundial: origen y consecuencias, se menciona que “En la gran mayoría de los estudios sobre respuesta de organismos al cambio climático (hechos de manera experimental) se han llegado a concluir que existe un desplazamiento de especies hacia mayores altitudes y hacia los polos; y algunos eventos de primavera de los ciclos de vida de diversas especies, en las últimas décadas se están presentando más temprano” (González E., y otros, 2003).

Como parte de un proceso de evolución y adaptación, la fauna se ha visto forzada a emigrar a zonas desconocidas, con el fin de encontrar las condiciones idóneas y semejantes a las que dicha especie estaba acostumbrada, todo ello impulsado por su instinto de supervivencia. No obstante, puede darse el caso de alguna especie que no logre adaptarse a estos cambios en su nuevo ecosistema, por lo que inevitablemente estará destinada a la extinción, provocando un desbalance ecológico al reducirse la biodiversidad en el ecosistema actual.

Para el caso de los humanos como especie, el instinto de supervivencia se ha ido desvaneciendo en los últimos siglos, todo ello a consecuencia del desarrollo de la tecnología, la cual nos brinda la comodidad suficiente para establecernos de forma permanente en un área determinada. Es por ello que, si el clima en el que se está acostumbrado a vivir deja de ser el adecuado y se reduce el área territorial habitable, el peligro de extinción para nuestra especie es igual de real y preocupante. Evidentemente, los países más afectados serán los que se encuentran en vías de desarrollo, y en específico las áreas marginales donde se tiene que lidiar con la falta de acceso a la infraestructura que proporcione los servicios básicos y de salud a sus habitantes en condiciones de decadencia.

Incluso la localización geográfica de estas zonas es un factor de riesgo, ya que existe un grado mayor de susceptibilidad a sequías en países áridos, principalmente en el continente Africano.

América Latina no es la excepción, además de sequías se prevé que aumente la cantidad de personas infectadas por enfermedades que puedan gestarse en zonas de clima templado.

De acuerdo con lo postulado en el artículo Cambio climático global: causas y consecuencias, “Se espera que la productividad agrícola se reduzca hasta en 30.0% en África y América Latina durante este siglo, por lo que aumentaría el riesgo de hambruna en algunos lugares de los trópicos y subtrópicos donde vive gran parte de la gente más pobre del mundo” (Estrada Porrúa, 2001).

Para un país que depende en gran medida de sus recursos naturales como lo es México, el cambio climático representa un impacto grave en su economía.

El petróleo como producto de exportación, era uno de las materias primas que generaba mayores divisas dentro de la economía mexicana en la década de los setentas. Sin embargo, al llegar la década de los ochentas los precios del petróleo a nivel global bajarían de manera drástica, mientras la deuda externa seguía en aumento, por lo que ahora el balance económico para México recaería en la industria maquiladora y la agrícola.

Para presentar la industria agrícola como parte del desarrollo económico contemporáneo, en el artículo La agricultura, la agroindustria y la restricción externa al crecimiento económico de México el autor nos sugiere que “la agricultura debe generar un excedente de productos comercializables por sobre la parte de la producción agrícola que es consumida en el mismo sector, ya sea como insumos y medios de subsistencia de los productores agrícolas” (Fujjii, 2000). Para lograr este objetivo, es fundamental que los agricultores cuenten con los recursos e infraestructura necesaria, que propicie el aumento en la productividad y eficiencia de las técnicas agrícolas aplicadas a sus parcelas de forma continua.

Los factores que intervienen en el proceso para lograr la productividad agrícola deseada son muy diversos, ya que variarán para cada tipo de cultivo, para la zona de trabajo, incluso dependerán del aspecto social y político de la región. Es cierto que las problemáticas anteriormente mencionadas son muy importantes, pero tal vez el factor más preocupante, y el que debe considerarse con especial relevancia por las razones que ya se han mencionado y analizado hasta este punto del texto, es el factor climatológico. Si bien es cierto que el problema que presenta el cambio climático en la agricultura puede resolverse parcialmente mediante la construcción de invernaderos para la protección de los cultivos y la dosificación de químicos y fertilizantes que ayuden a llegar a la producción y calidad esperada; aún queda por resolver el problema más grave que es el abastecimiento del agua necesaria para el riego parcelario, siendo este mismo un recurso no renovable.

A pesar de que la sequía es un problema del que se tiene conocimiento y con el cual se viene lidiando desde hace ya bastante tiempo, los organismos responsables de brindar este recurso a la población mexicana han optado por invertir el capital económico con el que se cuenta en propuestas de infraestructura, poco sustentable en su mayoría, para aumentar la cantidad de agua potable en zonas propensas a sequías. Esto se confirma en el artículo Los conflictos por el agua en México, el cual expone que “los mecanismos de mercado, precios y tarifas, han sido utilizados de manera limitada por las agencias gubernamentales para la regulación de la demanda de agua en los últimos años”...“cuando aún persiste la escasez crónica o aguda, se utiliza algún mecanismo de racionamiento” (Sainz Santamaría & Becerra Pérez, 2003).

En Michoacán, el cambio climático (y con ello la escasez de agua) trae como consecuencia una crisis de gran magnitud, ya que existen regiones en el estado que dependen completamente de la actividad agrícola.

En el artículo Cambio climático y vulnerabilidad municipal en Michoacán, se menciona que “Aproximadamente el 11% de la economía michoacana depende del sector primario en términos del PIB, a la vez que la propia agricultura detona otros sectores económicos relacionados con agroindustria, transporte y comercio, sobre todo la agricultura de exportación” (Ortiz Paniagua, Bonales Valencia, & Aguirre Ochoa, 2016).

Zamora es uno de los municipios más importantes del estado, ya que produce alrededor del 5% del bruto total agrícola. Principalmente genera cultivos de fresa, zarzamora y arándanos, aunque la tendencia en los últimos años ha crecido hacia la producción de aguacate, dejando en evidencia que Zamora y los municipios colindantes deben su crecimiento económico en gran medida al sector agrícola.

JUSTIFICACIÓN

Ante el problema de desabasto de agua que se presenta en la actualidad como consecuencia del cambio climático y la actividad humana, es necesario comenzar a aprovechar de una mejor manera el agua para riego con la que se cuenta, para evitar llegar a un punto de crisis en la producción agrícola en Zamora, Michoacán que afecte a los ciudadanos tanto en su economía como en su calidad de vida

OBJETIVO

Este proyecto de tesis tiene como objetivo desarrollar una propuesta que permita aprovechar eficientemente el agua superficial disponible en el distrito de riego 061 de Zamora, Michoacán, y con ello brindar a los usuarios el recurso necesario para aumentar y optimizar la producción de sus cultivos.

EL DISTRITO DE RIEGO 061 DE ZAMORA

Ubicación geográfica y datos de la zona de estudio

Zamora se ubica en el estado de Michoacán; entre los paralelos 19°56' y 20°07' de latitud norte; los meridianos 102°07' y 102°25' de longitud oeste; a una altitud de entre 1600 y 2400 m. La ciudad colinda al norte con los municipios de Ixtlán y Ecuandureo; al este con los municipios de Ecuandureo, Tlazazalca y Tangancícuaro; al sur con los municipios de Tancancícuaro y Jacona; al oeste con los municipios de Jacona, Tangamandapio, Chavinda e Ixtlán.

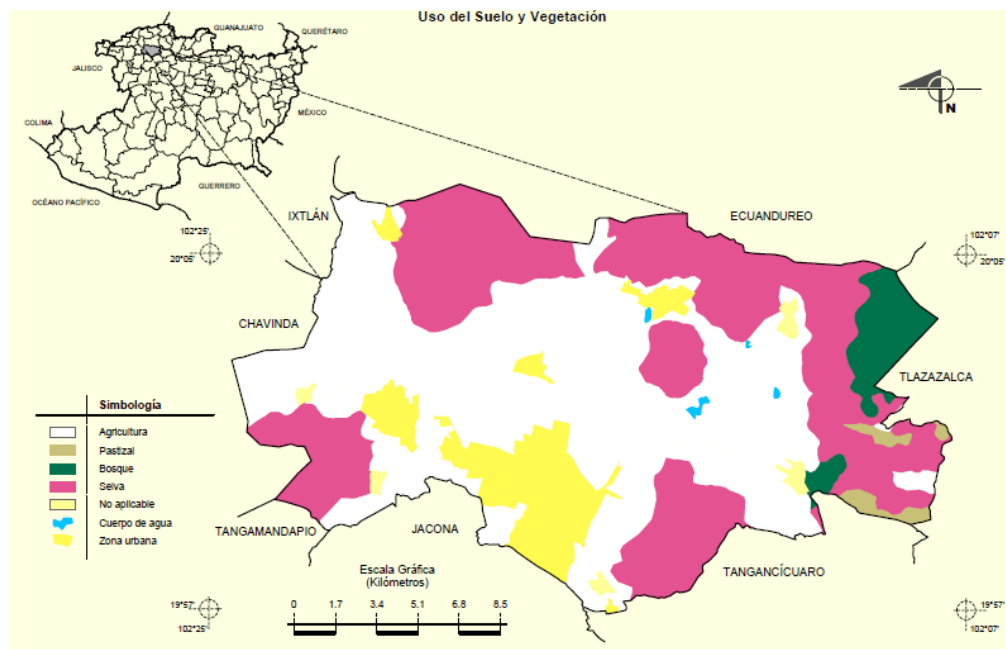


Figura 1. Mapa de uso de suelo y vegetación de Zamora, *Prontuario de información municipal de los Estados Unidos Mexicanos*, 2009.

Orografía

El relieve correspondiente al valle de Zamora corresponde al sistema volcánico transversal, así como los cerros de la Beata, la Beatilla, el Encinar, Tecari, el Ario y el Grande.

Su sistema de topoformas se conforma de Llanura aluvial en un 58.75%, Sierra volcánica de laderas tendidas con lomerío en un 23.83%, Escudo volcanes en un 11.29% y Sierra con laderas de escarpada de falla en un 6.13%.

Clima

El rango de temperatura habitual en Zamora se encuentra entre los 16 y 22°C. En la región, se presenta en mayor medida (82.53%) un clima semicálido-subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad. Con menor frecuencia (15.42%) se presenta un clima semicálido-subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media. Esporádicamente (2.05%) llega a presentarse un clima templado-subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media. El rango de precipitación anual en el municipio ronda entre los 700 y 1000 mm.

Hidrografía

El municipio se encuentra en la región hidrológica Lerma-Santiago, perteneciendo a la cuenca del Río Lerma-Chapala en su totalidad. La principal subcuenca con un 99.91% de cobertura de la región es la del Río Duero, y la subcuenca del Río Ángulo-Río Briseñas en menor medida con un 0.09% de cobertura.

El único río perenne en la región es el río Duero. Zamora cuenta con los ríos intermitentes Blanco, Celio, El Convento, El Patullo, Hondo, La Barranca, Lareño, Prieto y La Ceja.

A su vez, las presas Álvarez, del Colorín, la de Abajo también forman parte de su hidrografía.

Principales ecosistemas

La flora predominante en el municipio es la pradera, con huisache, mezquite, cardonal, nopal y matorrales espinosos. La superficie que puede ser utilizada como recurso natural maderable es ocupada por encino, mientras que la no maderable se forma de arbustos de especies variables.

La fauna que suele encontrarse en Zamora se conforma por paloma, codorniz, tordo, urraca, coyote, tlacuache, zorra y tejón.

Características y uso de suelo

El suelo en el que está asentado el municipio de Zamora data de los periodos Plioceno-Cuaternario y Cuaternario en mayor medida, y del periodo Neógeno en menor medida.

El tipo de roca que puede encontrarse en la zona es Ígnea extrusiva, siendo el basalto la roca predominante en la región. También puede encontrarse brecha volcánica básica y algunas rocas sedimentarias como la limolita-arenisca en un menor porcentaje.

El uso del suelo en mayor medida se destina a la agricultura y ganadería; mientras que en menor medida se ha destinado a zona urbana.

Composición del distrito de riego 061

La comunidad agrícola del valle de Zamora opera en distrito de riego 061, el cual fue creado por decreto presidencial el 20 de septiembre de 1938, para comenzar a operar el 5 de diciembre de 1938. El distrito se abastece del agua que escurre superficialmente por el Río Duero y sus respectivos afluentes, además del agua captada en las Presas Urepetiro y De Álvarez. También se sirve de las aguas subterráneas extraídas de los Manantiales Camécuaro, Verduzco, Orandino, La Estancia Igarteña y el Disparate, sirviéndose a su vez de las aguas del subsuelo concesionadas y extraídas mediante pozos profundos (Peritos, 2005). En el anexo VI puede verse a detalle el plano correspondiente al Distrito de riego 061, proporcionado por este mismo organismo.

La distribución de agua hacia los módulos de riego comienza con el Río Duero, el cual cuenta con la presa derivadora Chaparaco y la derivadora San Simón. De la Derivadora Chaparaco se desprende el canal Tamándaro, el cual abastece al módulo I; el canal principal Chaparaco que abastece al módulo II y el propio Río Duero que abastece al módulo III. La derivadora San Simón distribuye el agua hacia el módulo IV, a través de los canales el Cerro y Carbón.

La red de drenaje tiene la función de aprovechar el agua remanente utilizada en las zonas altas del Distrito. Esta red tiene como principal cauce el Dren “A” que se origina del río Duero y que se abastece del desagüe de las parcelas pertenecientes a los módulos I, II y III. A su vez, la distribución continúa con los Drenes Partidas, Palo Blanco, Vallado Prieto, La Galera y El Carrizo.

Problemática de desabasto de agua en el distrito de riego

Uno de los principales problemas que se presenta en el Distrito de riego de Zamora, es la falta de agua para riego en temporadas de estiaje.

De acuerdo con el Plan Director del Distrito de Riego 061 de Zamora, “De febrero a mayo disminuye la disponibilidad de recurso por el periodo de estiaje y se acumula la demanda de los cultivos otoño-invierno, de los perennes y se inician siembras primavera-verano, por lo que se presentan situaciones críticas para abastecer a la totalidad de los usuarios del distrito” (Peritos, 2005).

El hecho de que exista un desabasto de agua en gran medida tiene que ver con la poca eficiencia con la que se está aprovechando el recurso disponible para el riego, propiciado por la desinformación en los usuarios (ya que existe una cultura de desperdicio muy arraigada), la falta de infraestructura, de control institucional y la desigualdad en la distribución.

En el Plan Director del Distrito de Riego 061 de Zamora, se deja en claro que el volumen de agua disponible suele concentrarse en cultivos de alta demanda y renta de la tierra, ya que se expone que “el resultado del análisis de los últimos años muestra que la fresa consumió poco más del 50% del volumen bruto anual utilizado en el distrito, con un promedio de 1,907 hectáreas cultivadas, lo que representa el 15% de la superficie regada en promedio en años pasados” (Peritos, 2005).

Como consecuencia de la desigualdad en el reparto de agua para riego en las parcelas de los distintos módulos, se presenta un problema grave que tiene que ver directamente con el desabasto de agua en las zonas ubicadas al final del distrito de riego. “Algunos usuarios se han visto obligados a realizar perforaciones profundas para mantener el riego de sus parcelas, con el consecuente encarecimiento del servicio y la duplicación del volumen concesionado” (Peritos, 2005).

A partir de visitas de campo al Distrito de Riego y estableciendo foros de discusión con ejidatarios, se ha hecho visible la falta de agua en temporada de estiaje en algunas parcelas pertenecientes a los módulos III y IV. La zona más afectada se encuentra en Ario de Rayón, colindando con las colonias El Pochote y Miraflores Grande. En este punto el Desagüe General del Valle y una parte del caudal del Dren Partidas desembocan sobre el cauce del Dren “A”. El caudal restante perteneciente al Dren Partidas, continúa su curso por medio de un sifón invertido que atraviesa el Dren “A”, para abastecer de agua a las parcelas restantes. En la Figura 2 se muestra con una línea roja el cauce del Dren Partidas que continúa después del sifón invertido, evidenciando con puntos amarillos las áreas más críticas, donde se tiene mayor dificultad para conseguir el agua que se necesita para el riego parcelario.



Figura 2. Distrito de riego 061 de Zamora, Michoacán (módulos III y IV),
Elaboración propia, 2021.

FUNCIONAMIENTO DE UNA PRESA DERIVADORA

De acuerdo con los apuntes Presas derivadoras elaborados por el Ingeniero Héctor García Gutiérrez, una presa derivadora es una obra de captación de aguas superficiales. Este tipo de presas tiene la principal función de remansar el nivel de agua de la corriente, por medio de un dique vertedor que se construye perpendicularmente al cauce natural de un río. El agua es remansada con el objetivo de poder extraer un caudal definido en el diseño por medio de un canal derivador construido en alguna de las márgenes del río. De esta forma, es posible aprovechar las aguas superficiales sin afectar al régimen de la fuente de abastecimiento, ya que la principal función de este tipo de presas es elevar el tirante de agua del río para después ser vertido sobre el dique, por lo que no se contará con un volumen de almacenamiento disponible.

Las presas derivadoras pueden clasificarse por su geometría, por el material de construcción o por el tipo de cresta, como se describe a continuación:

- Presas derivadoras por su geometría en planta: Rectas, curvas.
- Presas derivadoras por su material de construcción: Rígidas, flexibles, mixtas.
- Presas derivadoras por su tipo de cresta: De cresta fija, de cresta móvil.

Una presa derivadora suele componerse de algunas obras complementarias principales, los cuales son: dique vertedor, obra de toma, canal desarenador y obra de desvío, que suele ser un canal derivador, que tendrá la función de llevar el caudal requerido hasta el punto de descarga.

Vertedor

Dado que la principal función de una presa derivadora es elevar el tirante de agua del cauce natural y no el de almacenar caudal, la cortina que se interpone al flujo del río trabajará como vertedor, comúnmente llamado dique.

Este dique debe ser impermeable, y la forma del vertedor que se suele instalar en presas derivadoras es el de tipo cimacio (Creager). Los cimacios consisten en una pared vertical o ligeramente inclinada en el lado del paramento aguas arriba, seguido de una cresta con perfil curvo, que continuará con una curva en sentido contrario la cual será prolongada hasta lograr que el final de la curva coincida con la pendiente del cauce para el tirante normal.

Como consecuencia del cambio brusco de pendiente a través del perfil del cimacio, se generará una rápida y un salto hidráulico; es por ello que es necesario revestir de un material rígido e impermeable el pie de cimacio, en la zona susceptible a erosión.

Obra de toma

La obra de toma o bocatoma consta en un orificio o conjunto de orificios (según lo requiera el diseño), que suelen ser de sección rectangular o circular. Estos orificios se ubican en un

muro vertical paralelo al sentido del cauce, obturados por compuertas del tipo deslizante o radial (según se requiera).

La instalación de compuertas es de suma importancia, ya que por medio de estas será posible controlar el gasto de extracción. El mecanismo de operación puede ser manual o automatizado, y dependerá de su viabilidad económica principalmente.

Canal desarenador

Cuando la fuente de abastecimiento de un sistema de riego es un río, es muy común que el sistema al que sirve tenga problemas de operación ocasionados por obstrucciones en las tuberías debido a las arenas arrastradas desde la obra de toma.

Para evitar estos inconvenientes, es necesario construir un canal desarenador, el cual permitirá acumular los sedimentos arrastrados por el flujo del río en el fondo del canal, evitando así que ingresen a la obra de toma.

Para una obra de captación como lo es una presa derivadora, este canal se construye con su sección longitudinal paralela al sentido con el que fluye el cauce, y su diseño deberá permitir que la velocidad del flujo sea la adecuada para permitir la sedimentación del material.

Para facilitar la instalación de compuertas, se recomienda que la sección transversal del canal sea rectangular. Dado que este canal es el intermediario entre el vertedor y la obra de toma, debe asegurarse que exista un escalón de al menos 20cm de profundidad entre los orificios de la obra de toma y el fondo del canal desarenador, de esta forma se logrará que el espacio sea suficiente para acumular un volumen adecuado de sedimentos que permita hacer una purga del canal más esporádica.

Es recomendable instalar rejillas a la entrada del canal, que sirvan como cribas para sólidos de gran tamaño que puedan afectar la operación de la presa.

Canal derivador

El canal derivador es el que ese encargará de llevar el caudal solicitado desde la obra de toma hasta la zona de descarga. Para facilitar el proceso constructivo y de diseño, su sección transversal suele ser trapecial.

La pendiente deberá ser, en la medida de lo posible, similar a la topografía del terreno para disminuir volúmenes de excavación y costos.

PRESAS DERIVADORAS EN EL DISTRITO DE RIEGO 061

De acuerdo con lo descrito en el apartado anterior, una presa derivadora puede ayudar a hacer más eficiente el aprovechamiento del agua superficial; y como prueba de ello, en el distrito de riego 061 de Zamora ya se han construido algunas presas de este tipo, que en cuanto a infraestructura son los elementos más importantes en la distribución del agua que fluye por el Valle de Zamora hacia los cuatro módulos de riego. En todo el distrito de riego se ubican 113 represas pequeñas y dos presas derivadoras, siendo estas últimas las de mayor relevancia para la distribución en el distrito ya que han sido construidas sobre el cauce del Río Duero para racionar el agua hacia los distintos módulos.

La Derivadora Chaparaco se ubica aproximadamente a 5 km del manantial las Adjuntas, y es la responsable de servir de agua a los módulos I, II y III, mientras que la Derivadora San Simón se ubica en la zona final del curso del Río Duero por el distrito de riego, y se encarga de abastecer de agua al módulo IV.

Ambas presas han ayudado a aprovechar el agua disponible en el principal afluente del distrito, llevando parte del caudal que escurre por el Río Duero a la mayor parte de las parcelas; dejando en evidencia que la construcción de una presa derivadora en la ubicación adecuada es sin duda una alternativa a considerar cuando se quiere lograr un aprovechamiento eficiente del agua para riego.

Dada la eficiencia que las presas derivadoras Chaparaco y San Simón han brindado al Distrito de Riego 061, se puede deducir que la construcción de una nueva presa derivadora que permita racionar el agua superficial disponible en Zamora podrá ayudar a resolver el desabasto de agua para riego que afecta a algunas de parcelas pertenecientes a los módulos III y IV.

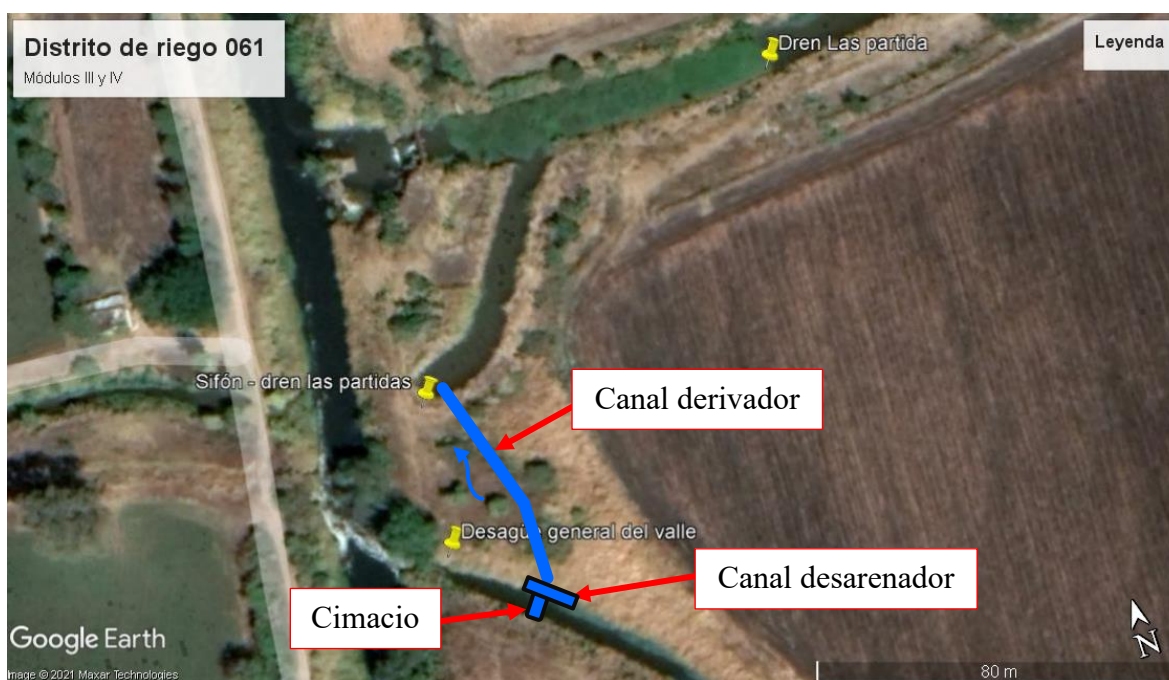


Figura 3. Propuesta de ubicación de presa derivadora, *Elaboración propia*, 2021.

Como ya se ha planteado con anterioridad, la zona donde el problema para encontrar agua es más crítico es en las parcelas que se sirven del Dren Partidas, después de que el afluente ha pasado por el sifón invertido. Es por ello que la ubicación propuesta para construir la nueva presa derivadora es sobre el cauce del Desagüe General del Valle, con el vertedor de cimacio interponiéndose al flujo de este mismo canal como se muestra ilustrativamente en la Figura 3.

Con el cimacio construido en el Desagüe General del Valle, será posible remansar el agua y elevar su tirante lo suficiente para, por medio de un canal, llevar el caudal solicitado por gravedad hasta el punto de descarga, que en este caso es la entrada al sifón invertido ubicado en el Dren Partidas.

En la figura 4 se muestra el curso que siguen los 3 cauces involucrados en la propuesta, viendo desde la margen izquierda del Dren “A”.

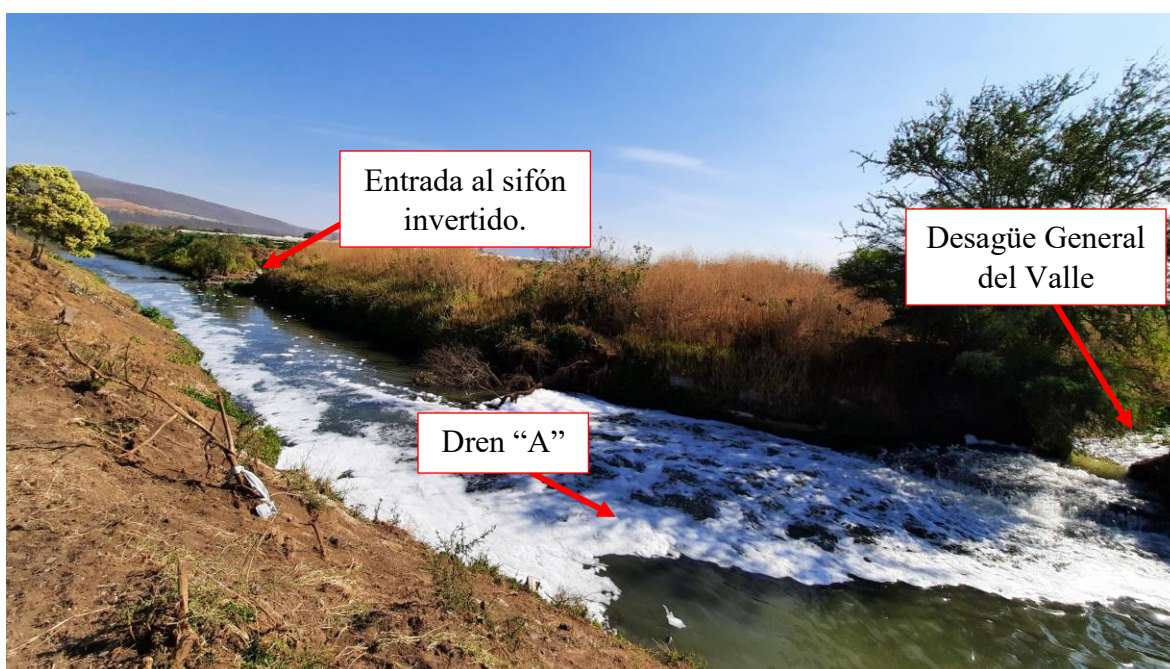


Figura 4. Visita al distrito de riego, *Elaboración propia*, 2021.

METODOLOGÍA

Topografía

El levantamiento topográfico de la zona donde se planea construir la presa derivadora, se realizó utilizando una estación total Leica TS-06. A partir de los puntos levantados con la estación total, se triangularon los puntos intermedios para obtener las curvas de nivel que serán de utilidad en el proyecto por medio del software CivilCAD, que es una extensión desarrollada para el software AutoCAD, que permite facilitar algunas actividades dentro del procesamiento de proyectos civiles y topografía, por medio de comandos programados para ello.

Debido a que el terreno de la zona de estudio es bastante plano, dentro del procesado de las curvas de nivel en CivilCAD se definió una equidistancia entre curvas gruesas de 1m, mientras que en la separación entre curvas delgadas se definió de 0.25m, como se muestra en la Figura 5. Para ver las curvas de nivel más a detalle, revisar el plano topográfico en el Anexo II.

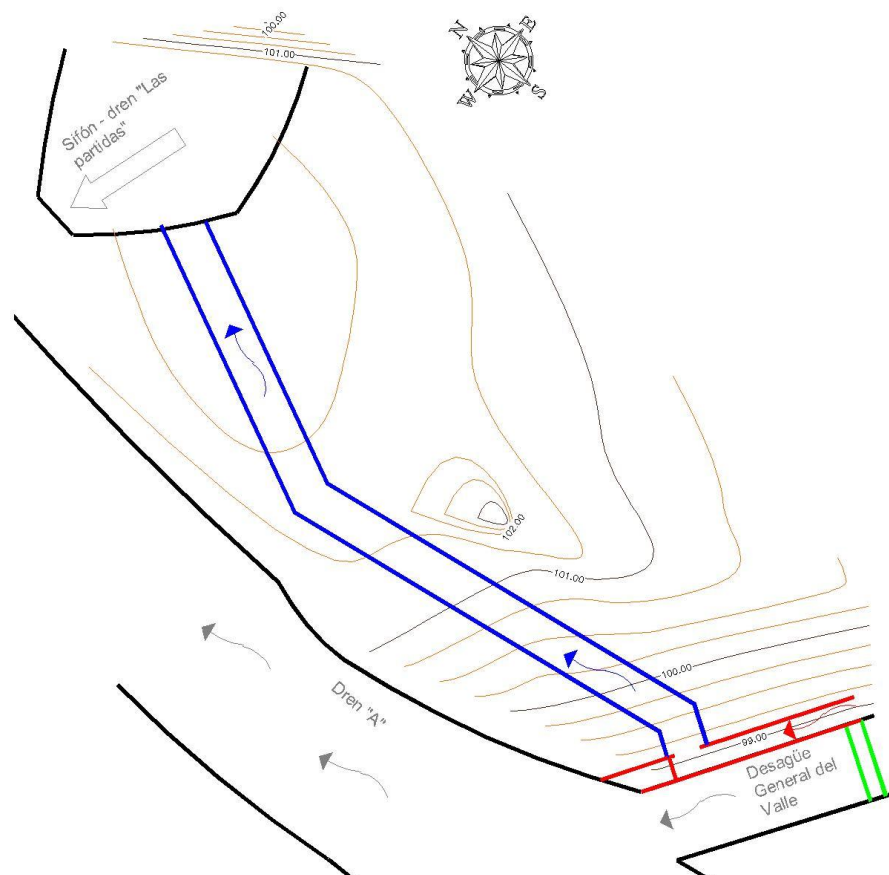


Figura 5. Topografía del terreno, *Elaboración propia*, 2021.

Diseño de la obra de toma

Previo al dimensionamiento de la obra de toma y de los demás elementos a calcular, se tomaron en cuenta algunas recomendaciones importantes que ayudarán a garantizar el correcto funcionamiento de la presa derivadora.

Estas recomendaciones han sido publicadas por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en su manual “Diseño hidráulico y estructural de presas derivadoras”.

Para la bocatoma se recomienda lo siguiente:

- Los orificios se localizaran en un tramo de la corriente que esté a salvo de la erosión, del azolve y aguas arriba de cualquier descarga de tipo residual.
- La bocatoma será ubicada a una profundidad inferior al de las aguas mínimas de la corriente de abastecimiento. Como mínimo, se deberá garantizar una carga de 0.1m sobre el orificio.
- Instalar rejillas con separaciones de 3 a 5cm para evitar la entrada de sólidos grandes.
- La velocidad mínima dentro del conducto de los orificios será de 0.6 m/s, para evitar posibles azolvamientos que obstruyan la entrada de agua.
- Para evitar que los sedimentos asentados se pongan nuevamente en suspensión, se recomienda que la velocidad en el orificio sea poco mayor a la velocidad proveniente del canal desarenador y casi igual a la velocidad en el canal derivador.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas, para realizar el dimensionamiento de la sección transversal del orificio se puede recurrir a la ecuación de la continuidad, despejando para dejar el área mínima de la bocatoma en función del gasto de derivación y de la velocidad propuesta.

$$A = \frac{Q}{V}$$

Donde:

- A= Área transversal
- Q= Gasto de derivación en la toma (m³/s).
- V= Velocidad en la obra de toma (m/s).

Para obtener la carga necesaria sobre la obra de toma puede utilizarse la fórmula para el cálculo del gasto en vertedores, que a su vez se obtiene a partir de la ecuación de la velocidad de Torricelli.

$$Q = C.A.\sqrt{2gH}$$

Y haciendo un despeje se tiene la siguiente expresión: $H = \frac{\left(\frac{Q}{AC}\right)^2}{2g}$

Donde:

- Q = Gasto de derivación o gasto normal en la toma (m^3/s).
- C = Coeficiente de gasto para los orificios (adimensional).
- A = Área de la sección transversal del orificio (m^2).
- g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).
- H =Carga hidráulica sobre el orificio (m).

Para aplicar la fórmula anterior, es necesario conocer el coeficiente de descarga. Para obtener el coeficiente más acercado a la realidad suele realizarse una serie de experimentos con maquetas, no obstante Sotelo menciona en su libro “Hidráulica General, Volumen 1. Fundamentos”, que si el número de Reynolds resulta menor a 10^5 , el coeficiente de descarga podrá obtenerse con la Figura 6. Caso contrario, este valor será igual a 0.6

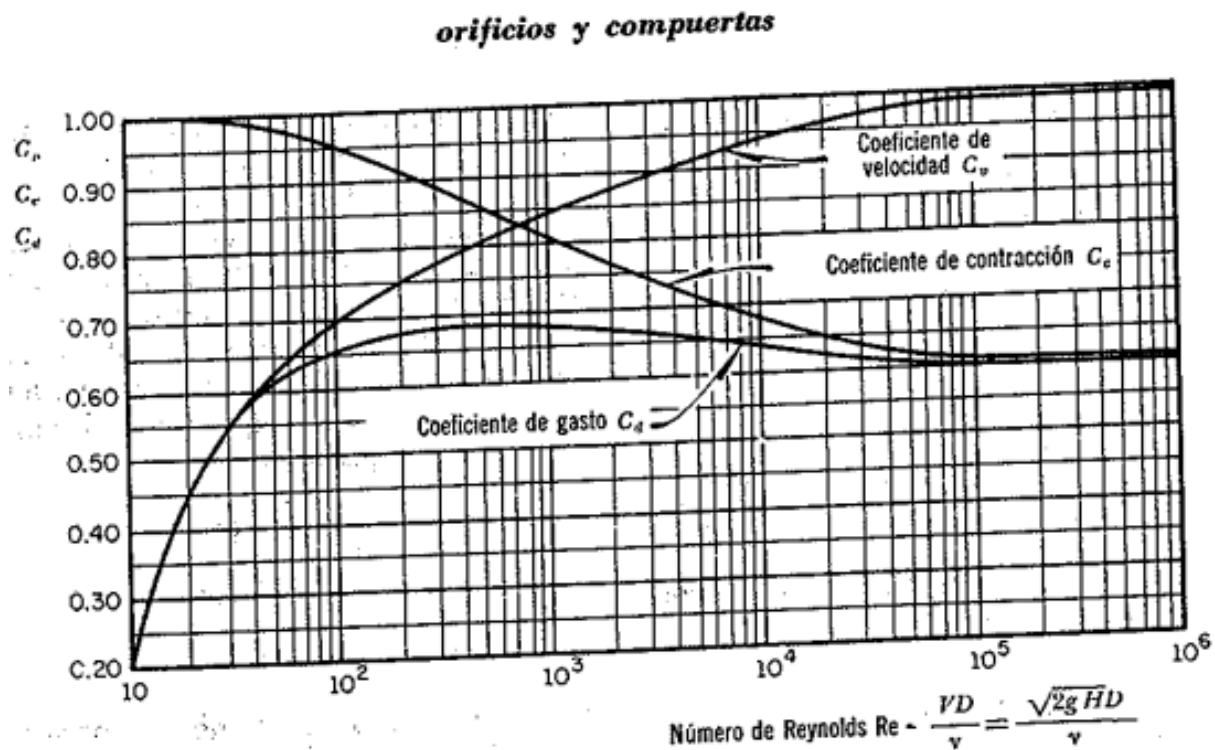


Figura 6. Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto, con el número de Reynolds en un orificio circular, *Hidráulica General Volumen 1: Fundamentos*, p. 208, 1997.

Diseño del canal derivador

Dentro del diseño hidráulico, es importante considerar el comportamiento que tendrá el flujo en el canal, ya que de ello dependerá el grado de dificultad del análisis en el modelo simulado y el correcto funcionamiento en el modelo real. Teniendo en cuenta lo anterior, se sabe que “El flujo uniforme se presenta cuando la velocidad media permanece constante en cualquier sección del canal, por lo que su área hidráulica y tirante también son constantes” (Sotelo Ávila, Hidráulica de canales, 2002).

Siendo el canal derivador un canal artificial con sección prismática, para el diseño hidráulico puede establecerse que el tipo de flujo en este es uniforme. Sin embargo, podrá ser uniforme permanente o variado dependiendo de algunos factores constructivos y de operación que serán considerados en su diseño.

El flujo uniforme permanente se origina cuando el tirante a lo largo del canal no cambia con el tiempo, siendo un estado ideal que ayuda a simplificar el cálculo hidráulico, pero que en la práctica se presenta con muy poca frecuencia.

Por otro lado, el flujo uniforme variado se presenta cuando la velocidad a lo largo del canal es distinta como consecuencia de una variación en la pendiente, en la sección o por la presencia de estructuras de control que no permiten que se logre el estado uniforme permanente, siendo esto lo que más suele presentarse en la realidad.

Para el cálculo de las propiedades geométricas de un canal prismático, Sotelo ha expuesto en su libro “Hidráulica de canales” algunas ecuaciones que van a variar de acuerdo al tipo de sección transversal que tenga el canal, y que se muestran en la Figura 7.

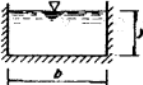
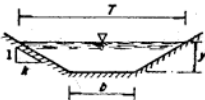
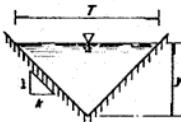
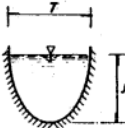
SECCION ELEMENTO GEOMÉTRICO	RECTANGULAR	TRAPEZIAL	TRIANGULAR	PARABOLICA
				
Área , A	$b y$	$(b + k y) y$	$k y^2$	$\frac{2}{3} T y$
Perímetro mojado P	$b + 2 y$	$b + 2 \sqrt{1 + k^2} y$	$2 \sqrt{1 + k^2} y$	$T + \frac{8}{3} \frac{y^2}{T}$ *
Radio hidráulico $R_h = A / P$	$\frac{b y}{b + 2 y}$	$\frac{(b + k y) y}{b + 2 \sqrt{1 + k^2} y}$	$\frac{k y}{2 \sqrt{1 + k^2}}$	$\frac{2 T^2 y}{3 T^2 + 8 y^2}$ *
Ancho de la superficie libre, T	b	$b + 2 k y$	$2 k y$	$\frac{3}{2} \frac{A}{y}$
Tirante medio A / T	y	$\frac{(b + k y) y}{b + 2 k y}$	$\frac{1}{2} y$	$\frac{2}{3} y$
dP / dy	2	$2 \sqrt{1 + k^2}$	$2 \sqrt{1 + k^2}$	$\frac{16}{3} \frac{y}{T} + (1 - \frac{8}{3} \frac{y^2}{T^2}) \frac{T}{2 y}$ *
dT / dy	0	$2 k$	$2 k$	$\frac{T}{2 y}$

Figura 7. Elementos geométricos de las secciones más comunes, *Hidráulica de canales*, p. 5, 2002.

La sección más común utilizada en canales con y sin recubrimientos suele ser la trapezoidal, la cual corresponde también a la sección propuesta para este canal.

Dicho lo anterior, las expresiones que serán utilizadas para el diseño hidráulico del canal derivador serán las siguientes:

$$A = y(b + ky)$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + k^2}$$

$$Rh = \frac{A}{P}$$

Donde:

- A= Área de la sección (m²).
- P= Perímetro mojado (m).
- Rh= Radio hidráulico (m).
- b= Ancho de plantilla del canal (m).
- k= Talud (adimensional).
- y= tirante normal en el canal (m).

El tirante normal en el canal podrá ser calculado a partir de la ecuación de la continuidad en función del gasto de derivación y de la velocidad del canal, ya que como dato preliminar en el cálculo del canal derivador, se establecerá la misma velocidad del flujo que se propuso para la obra de toma.

$$A = \frac{Q}{V}$$

A continuación, se muestra el uso de la fórmula de Manning, despejando para poder obtener la pendiente en función de las propiedades geométricas del canal, su velocidad y el material de recubrimiento:

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

$$S = \left(\frac{V * n}{Rh^{2/3}} \right)^2$$

Donde:

- V= Velocidad en el canal (m/s).
- A= Sección transversal (m²).
- Q= Gasto de derivación (m³/s).
- n= Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional).
- Rh= Radio hidráulico (m).
- S= Pendiente en el fondo del canal (adimensional).

Para obtener las dimensiones finales del canal, es necesario proponer algunas propiedades que se mantendrán constantes, las cuales son el ancho de plantilla, el talud, y el material de revestimiento, para a partir de estos datos calcular el tirante normal a través de iteraciones.

El tirante normal en el canal derivador será aquel con el que, al calcular la velocidad con la ecuación de Manning y el caudal, se obtengan el mismo gasto de derivación y la velocidad propuesta en la obra de toma.

Diseño del canal desarenador

En el diseño hidráulico del canal desarenador interviene una variable más que es el tipo de sedimento, ya que las dimensiones finales del canal dependerán de la velocidad de caída de las partículas que se encuentran en el flujo de llegada. Es por ello que es importante visitar la zona de estudio para conocer el tipo de material que se encuentra alrededor con el fin de obtener sus propiedades físicas, tales como diámetro promedio de la partícula y peso específico promedio.

Para obtener las propiedades geométricas en el canal desarenador, se utilizarán las ecuaciones para canales rectangulares expuestas en la Figura 6, las cuales son:

$$A = b * y$$

$$P = b + 2y$$

$$Rh = \frac{A}{P}$$

Donde:

- A= Área de la sección (m²).
- P= Perímetro mojado (m).
- Rh= Radio hidráulico (m).
- b= Ancho de plantilla del canal (m).
- y= tirante normal en el canal (m).

El área transversal en el canal puede obtenerse a partir de la ecuación de la continuidad, proponiendo una velocidad lo suficientemente lenta para que los sedimentos puedan asentarse en el fondo del canal. Para que esto suceda, se recomienda que la velocidad en el canal desarenador se encuentre en el intervalo de 0.5 a 0.3 m/s.

Es importante tomar en cuenta las elevaciones ya calculadas para el tirante normal en el canal derivador y la obra de toma, ya que a partir de estas dimensiones y adicionándole el escalón mínimo de 20 cm hasta el fondo del canal, podrá fijarse un tirante mínimo en el canal desarenador, con las ecuaciones que se muestran a continuación.

$$Z_{\text{Sup.libre en el desarenador}} = Z_{\text{fondo del canal derivador}} + y_{\text{derivador}} + H_{\text{obra de toma}}$$

$$Y_{\text{Mín.en el desarenador}} = Z_{\text{Sup.libre en el desarenador}} - Z_{\text{fondo del canal derivador}} + \Delta z$$

El tirante normal en el canal desarenador será calculado a partir de un proceso iterativo, comenzando por obtener el ancho de plantilla.

Ya se ha calculado con anterioridad el área transversal necesaria en función del gasto de derivación y la velocidad propuesta, además, se ha calculado un tirante mínimo, por lo que el ancho de plantilla aproximado podrá calcularse con la siguiente expresión:

$$b = \frac{A}{y}$$

El ancho de plantilla que resulte de esta operación será redondeado a la medida comercial más próxima de compuerta, y con ella será calculado un nuevo tirante con la siguiente expresión:

$$y = \frac{A}{b}$$

El proceso iterativo finalizará solo si se cumplen las siguientes condiciones:

- El tirante propuesto deberá ser mayor o igual al tirante mínimo anteriormente calculado.
- El ancho de plantilla deberá ajustarse al ancho de una compuerta comercial.
- El área calculada con el tirante y ancho de plantilla deberá ser igual al área transversal calculada en función de la velocidad y el gasto de derivación.
- Existirá una diferencia mayor o igual a 20 cm entre el fondo del canal desarenador y la obra de toma.

Una vez que se ha encontrado el tirante normal y el ancho de plantilla para el canal, lo siguiente será establecer la longitud mínima necesaria para que se asienten los sólidos sedimentables.

Teniendo el dato del tipo de sedimento a partir de visitas de campo, se puede obtener su relación de peso específico con respecto al peso específico del agua con la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{\gamma - \gamma_s}{\gamma}$$

Donde:

- Δ = Relación de pesos específicos (adimensional).
- γ_s = Peso específico del sedimento (m^3/s).
- γ = Peso específico del agua (m^3/s).

A partir de la relación de pesos específicos, se puede obtener la velocidad de caída de la partícula con la ecuación propuesta por Rubey en 1933, la cual se muestra a continuación.

$$W_c = F1\sqrt{g\Delta Dp}$$

Para la ecuación anterior, F1 representa:

$$F1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta Dp^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{g\Delta Dp^3}}$$

Donde:

- W_c = Velocidad de caída de las partículas en el fluido (m/s).
- Δ = Relación de pesos específicos (adimensional).
- g = Aceleración de la gravedad (9.81 m²/s).
- D_p = Diámetro promedio de la partícula (m).
- ν = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).

Con la velocidad de caída de las partículas y el caudal de derivación, puede establecerse un área longitudinal mínima usando la siguiente ecuación.

$$A_L = \frac{Q}{W_c}$$

Donde:

- A_L = Área longitudinal en el canal (m²).
- Q = Gasto de derivación (m³/s).
- W_c = Velocidad de caída de las partículas en el fluido (m/s).

Con el área longitudinal y el ancho de plantilla conocidos, se puede establecer la longitud necesaria en el canal para que las partículas se sedimenten, a partir de la siguiente expresión.

$$L_s = \frac{A_L}{b}$$

Donde:

- L_s = Longitud de sedimentación en el canal (m).
- A_L = Área longitudinal en el canal (m²).
- b = Ancho de plantilla en el canal (b).

Para obtener la longitud mínima en el canal, la longitud de sedimentación será aumentada un 20% como factor de seguridad, y se le adicionará el diámetro de la obra de toma y el espacio que existirá entre la compuerta en el canal y los orificios de la bocatoma, como se muestra a continuación.

$$L_{\min} = [L_s + 20\%] + Diam_{Bocatoma} + Long. \text{ entre compuerta y bocatoma}$$

Diseño del cimacio vertedor

Previo al diseño del cimacio, es necesario realizar un aforo del canal sobre el cual se construirá el vertedor por el método de mayor conveniencia para el proyecto, ya que este dato será de utilidad para obtener la carga hidráulica sobre la cresta del cimacio.

Para obtener el perfil del vertedor del tipo Creager o cimacio, El manual de “Diseño hidráulico y estructural de presas derivadoras” emitido por la SAGARPA sugiere sea utilizada la ecuación desarrollada por Scimeni E., que a base de experimentación logró definir la tendencia que forma el perfil de un cimacio.

$$y = 0.5 \frac{x^{1.85}}{H_v^{0.85}}$$

Donde:

- H_v =Carga de diseño sobre el vertedor (m).
- X,Y= Coordenadas de un sistema cartesiano, que definirán el perfil del cimacio (m).

Con la fórmula de Scimeni, es posible obtener una coordenada Y en el plano cartesiano a partir de una coordenada X propuesta y de la carga hidráulica sobre la cresta.

La carga hidráulica se puede obtener a partir de la ecuación general para vertedores de pared delgada.

$$Q = C * b * H_v^{\frac{3}{2}}$$

Siendo C:

$$C = \frac{2}{3} \sqrt{2g\mu}$$

Donde:

- Q= Caudal en el cauce (m^3/s).
- b=Longitud de la cresta del vertedor (m).
- H_v = Carga de diseño sobre la cresta (m).
- g= Aceleración de la gravedad (m^2/s).
- μ = Coeficiente de gasto (adimensional).

El coeficiente μ , dependerá de las dimensiones del vertedor y de acuerdo con lo expuesto en “Hidráulica General Vol. 1” de Sotelo, puede calcularse con alguna de las ecuaciones obtenidas experimentalmente que se muestran en la Figura 8.

Autor	Fórmula	Límites de aplicación	Observaciones
Hegly (Ref. 30) (1921)	$\mu = \left[0.6075 - 0.045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] \times$ $\times \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0.10 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.50 \text{ m} \leq b \leq 2.00 \text{ m}$ $0.20 \text{ m} \leq w \leq 1.13 \text{ m}$	El primer límite de aplicación es el más importante. Para $h/b > 0.13$ tiene mayor precisión que la fórmula SIAS.
Sociedad de Ingenieros y Arquitectos Suizos (1924). (Ref. 9) (Fórmula SIAS)	$\mu = \left[0.578 + 0.037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3(b/B)^2}{1000h + 1.5} \right] \times$ $\times \left[1 + 0.5 \left(\frac{b}{B} \right)^4 \left(\frac{h}{h+w} \right)^3 \right]$	$0.025 \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \leq 0.3 B$ $w \geq 0.30 \text{ m}$ $\frac{h}{w} \leq 1$ en el caso de contracciones laterales	Para vertedores sin contracciones laterales los límites son: $0.025 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $\frac{h}{w} \leq 1$ Para $h/b \leq 0.13$, es más precisa que la de Hegly.
Hamilton-Smith	$\mu = 0.616 \left(1 - \frac{b}{10B} \right)$	$0.075 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq b$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $h \leq \frac{w}{2}$ $b \leq (B - 2h)$ $\frac{h}{b} \leq 0.5$	Si $B(h+w) < 10bh$, se deberá reemplazar en la Ec. (7.5) el valor de h por h' donde $h' = h + 1A \left(\frac{V_o^2}{2g} \right)$ donde: $V_o = \left[\frac{Q}{B(h+w)} \right]$ es la velocidad de llegada
Francis (Ref. 31)	$\mu = 0.623 \left[1 - 0.1n \frac{h}{b} \right] \left[\left(1 + \frac{V_o^2}{2gh} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_o^2}{2gh} \right)^{3/2} \right]$	$0.18 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$ $2.40 \text{ m} \leq b \leq 3.00 \text{ m}$ $0.60 \text{ m} \leq w \leq 1.50 \text{ m}$ $b \geq 3h$	$V_o = \frac{Q}{B(h+w)}$ velocidad de llegada. $n = 2$ en vertedores con contracciones laterales. $n = 0$ en vertedores sin contracciones laterales.
Rehbock (1929) (Ref. 9)	$\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h + 0.0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{3/2}$	$0.01 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \geq 0.30 \text{ m}$ $w \geq 0.06 \text{ m}$ $\frac{h}{w} \leq 1$	Vale sólo para vertedores sin contracciones laterales. Es muy precisa y de las más utilizadas, por su sencillez.

Figura 8. Fórmulas experimentales para determinar el coeficiente de gasto μ para vertedores rectangulares con contracciones laterales o sin ellas, *Hidráulica General Vol. 1*, p. 246, 1997.

Tratándose el cimacio de un vertedor sin contracciones laterales, vale la pena seleccionar la ecuación propuesta por Rehbock en 1929 por su alta precisión.

$$\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{Hv + 0.0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{Hv} \right]^{3/2}$$

Donde:

- μ = Coeficiente de gasto (adimensional).
- Hv = Carga de diseño sobre la cresta (m).
- w = Altura de la pared del vertedor (m).

Sustituyendo la ecuación de Rehbock en la ecuación general para vertedores se tiene:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{Hv + 0.0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{Hv} \right]^{3/2} * b * H_v^{3/2}$$

Y dado que el caudal ya fue obtenido mediante un aforamiento previo en la zona de estudio, solo queda como incógnita la carga hidráulica. Por lo tanto, despejando la ecuación anterior para H_v se tiene la siguiente expresión.

$$\left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{H_v + 0.0011}{w}\right)\right] \left[1 + \frac{0.0011}{H_v}\right]^{\frac{3}{2}} * H_v^{\frac{3}{2}} = \frac{3Q}{2\sqrt{2g} * b}$$

De esta forma, el valor correspondiente a la carga hidráulica necesaria para proyectar el perfil del cimacio se obtendrá iterando hasta encontrar un valor para el cual logre cumplirse la igualdad.

Cálculo de la longitud del salto hidráulico

Como consecuencia del cambio brusco de pendiente en el vertedor, se presentará un cambio de régimen en el flujo, generando así un salto hidráulico. La energía producida durante el trayecto del salto puede provocar que el fondo del canal sea erosionado con el tiempo, poniendo en riesgo la estabilidad del vertedor; es por ello que es fundamental reforzar esta zona con concreto.

Dado que el tirante aguas arriba del cimacio deberá ser mayor que el tirante crítico y el tirante aguas abajo del cimacio será menor que el crítico, se puede deducir que el salto hidráulico se comenzará al pie del cimacio del vertedor. Para obtener la longitud del salto, es necesario ubicar ambos tirantes, además del tirante crítico.

El tirante Y_1 quedará obligado por el gasto y la altura de caída. Este tirante debe ser el conjugado menor para que pueda iniciar al pie del cimacio. El conjugado menor a su vez producirá un conjugado mayor Y_2 , que deberá ser igual al tirante normal en el canal, ya que solo de esta forma se impedirá que el salto se mueva.

De acuerdo con lo expuesto en “Hidráulica de canales” por Sotelo, la condición crítica se representa con la siguiente expresión:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{B}$$

Y dado que se trata de una sección rectangular, el tirante crítico Y_c puede obtenerse con:

$$Y_c = \left[\frac{Q^2}{gb^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

- Y_c = Tirante crítico en el canal (m).
- Q = Caudal en el vertedor (m^3/s).
- g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).
- b = Ancho de plantilla (m).

Para encontrar ambos conjugados, es necesario establecer puntos de control que ayuden en el cálculo. Como se sabe que el salto hidráulico se presentará al pie del cimacio, los puntos de control recomendados son tres:

- En la pared del vertedor aguas arriba, donde el tirante es conocido.
- Al pie del cimacio, donde se ubicará el conjugado menor.
- Algunos metros después siguiendo el sentido del flujo, donde se ubicará el conjugado mayor. La longitud será rectificadora una vez encontrados ambos tirantes.

El conjugado menor se calculará por tanteos a partir de la ecuación de la energía, tomando como punto de control “0” la energía que se presenta antes de la pared del vertedor, mientras que la energía en el punto de control “1” será la que se produce al pie del cimacio (donde se presentará el conjugado menor).

$$Z_0 + Y_0 + \frac{V_0^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + hr$$

Donde:

- Z =Desnivel presentado desde el fondo del canal hasta la cota de referencia (m).
- Y =Tirante en el punto de control (m).
- $V^2/2g$ = Carga de velocidad (m).
- hr = Pérdida de energía entre los puntos de control = $k(V^2/2g)$, donde $k=0.1$

Dado que se trata de una sección rectangular, el conjugado mayor podrá calcularse en función del conjugado menor y de su número de Froude:

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right]$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \text{ (En canales rectangulares).}$$

Una vez obtenidos los conjugados mayor y menor, se podrá calcular la longitud mínima de revestimiento para evitar que el fondo del canal sea erosionado.

Aún no existe algún procedimiento teórico para calcular la longitud del salto hidráulico, no obstante se han desarrollado algunas ecuaciones a partir de la experimentación, y que han sido bastantes efectivas en la práctica, las cuales se muestran en la Figura 9.

Dado que el uso de cada ecuación otorgará un resultado diferente, es recomendable utilizar al menos tres ecuaciones para tener una referencia de los resultados, y elegir la que sea más conveniente según el criterio de quien proyecta.

Autor	Ecuación	Observaciones
Fawer	$l = \frac{1.2 (2 \pi) y_2}{\sqrt{2.5 [(y_2/y_1)^3 - 1]}}$	Longitud de la onda en un salto ondular, según figura 4.21a, referencia 10.
Silvester	$L_j / y_1 = 9.75 (F_1 - 1)^{1.01}$	Ecuación original (referencia 8).
Peterka	$L_j / y_2 = 3.491 + 0.73 F_1 - 0.06 F_1^2 + 0.001441 F_1^3$	Ecuación aproximada (referencia 6).
Woyciki	$L_j / (y_2 - y_1) = 8 - 0.05 (y_2/y_1)$ $L_j / y_1 = 4.05 \sqrt{1 + 8 F_1^2} - 0.1 F_1^2 - 12.05$	Ecuación original (referencia 11). Ecuación deducida de la original.
Smetana y Tizon	$L_j / y_1 = 6 [(y_2/y_1) - 1]$ $L_j / y_1 = 3 \left[\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 3 \right]$	Ecuación original (referencia 12). Ecuación deducida de la original.
Pavlovsky	$L_j / y_1 = 2.5 [1.9 (y_2/y_1) - 1]$ $L_j / y_1 = 2.375 \sqrt{1 + 8 F_1^2} - 4.875$	Ecuación original (referencia 13). Ecuación deducida de la original.
Ludin	$(y_2 - y_1)/L_r = [1/4.5] - [1/(6F_1)]$ $L_r / y_1 = [13.5 F_1 / (6F_1 - 4.5)] \left[\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 3 \right]$	Ecuación original (referencia 12). Ecuación deducida de la original.
Safranez	$L_r / y_1 = 6 F_1$	Ecuación original (1929) para $1.72 < F_1 < 19.1$ (referencia 14).
Pietrkowsky	$L_r / y_1 = 5.9 F_1$	Ecuación original (1932) para $5.5 < F_1 < 19.8$ (referencia 15).
Chertousov	$L_j / y_1 = 10.3 \left(\sqrt{F_1} - 1 \right)^{0.81}$	Ecuación original (referencia 16). Se desconoce el significado de L .
Einwachter	$L_j / y_1 = 8.3 \left(\sqrt{F_1} - 1 \right)$	Ecuación original (1932) para $2.5 < F_1 < 6.95$, (referencia 17). Se desconoce el significado de L .
Pikalov	$L_j / y_1 = 4 \sqrt{1 + 2 F_1}$	Ecuación original (referencia 12). Se desconoce el significado de L .
Rajaratnam	$L_j / y_2 = 6.2 \tanh (F_1/3)$ $L_j / y_2 = 6$ $L_j / y_1 = 3 \left(\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1 \right)$	Ecuación original, para $2 < F_1 < 12$. Ecuación aproximada, para $4 < F_1 < 16$. Ecuación deducida, para $4 < F_1 < 16$. Referencia 18 (1967).
Sarma y Newnham	$L_r / y_1 = 6.73 (F_1 - 1)$ $L_j / L_r = 1.3$	Ecuaciones originales, para $1.21 < F_1 < 3.79$. Referencia 19 (1973).
Malik	$L_r / y_1 = 6.2 F_1 - 10.4$ $+ \left[5 F_1 - 7.5 + 0.17 (F_1 - 3)^4 \right] \frac{y_1}{b}$	Ecuación deducida a partir de observaciones, para $3 \leq F_1 \leq 6$, (referencia 20) (1972).
Bretz	$L_r / y_1 = 6.29 F_1 - 3.59$	Ecuación original, para $3.3 < F_1 < 15.3$. Referencia 7 (1987).
Hager, Bremen y Kawagoshi	$L_r / y_1 = 160 \tanh (F_1/20) - 12$ $L_r / y_1 = 100 \tanh (F_1/12.5) - 12$ $L_r / y_1 = 8 (F_1 - 1.5)$ $L_r = 6 y_2$	Para $2 < F_1 < 16$, y $y_1/b < 0.10$. Para $2 < F_1 < 12$, y $0.10 < y_1/b < 0.7$. Para $2.5 < F_1 < 8$. Para $4 < F_1 < 12$. Ecuaciones originales (referencia 20) (1990).
Leutheusser, Kartha	$L_r / y_2 = 15.7$ después de una rápida $L_r / y_2 = 12$ después de una compuerta	Para $3 < F_1 < 14$. L , distancia hasta la sección en que termina la influencia del salto en la distribución de la velocidad. ASCE, JHD, vol. 98, HY8 (1972).

Figura 9. Ecuaciones experimentales más comunes para el cálculo de la longitud del salto hidráulico en canales rectangulares horizontales, *Hidráulica de canales*, p. 317, 2002.

RESULTADOS

Obra de toma

Anteriormente se ha establecido que por recomendación de la SAGARPA presentada en “Diseño hidráulico y estructural de presas derivadoras”, la velocidad mínima en los orificios deberá ser de 0.6 m/s. Para el diseño de este proyecto en específico se propuso una velocidad de 0.8 m/s (mayor a la mínima recomendada), por lo que el área necesaria de los orificios será:

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{0.8 \text{ m/s}} = 1.25 \text{ m}^2$$

Con el área necesaria conocida, puede obtenerse el diámetro de la siguiente manera:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(1.25)}{\pi}} = 1.262 \text{ m} = 49.998 \text{ in}$$

Dado que el diámetro requerido es muy grande, y para facilitar el procedimiento constructivo se optó por colocar dos orificios, de 25 in de diámetro cada uno.

Para calcular la carga necesaria de vertido sobre la obra de toma se deberá contar en primera instancia con el caudal que transportará cada orificio, por lo cual se dividirá el gasto a derivar entre el número de orificios, con lo que se tiene:

$$q_{\text{unitario}} = \frac{Q_{\text{deriv.}}}{\text{No. de orificios}} = \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{2} = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para obtener el coeficiente de descarga en el orificio es necesario conocer el número de Reynolds, y considerando una viscosidad cinemática de 1.01×10^{-6} a una temperatura de 20°C se tiene:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{0.8 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.635 \text{ m}}{1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 502,472.80$$

De la Figura 6, y en función del Número de Reynolds, se tiene que el coeficiente de gasto **Cd=0.62**

Para este coeficiente Cd, la carga necesaria sobre la obra de toma será entonces la siguiente:

$$H = \frac{\left(\frac{Q}{AC}\right)^2}{2g} = \frac{\left(\frac{0.5 \text{ m}^3/\text{s}}{0.317 \text{ m}^2 * 0.61}\right)^2}{2 * 9.81 \text{ m}^2/\text{s}} = 0.13 \text{ m}$$

orificios y compuertas

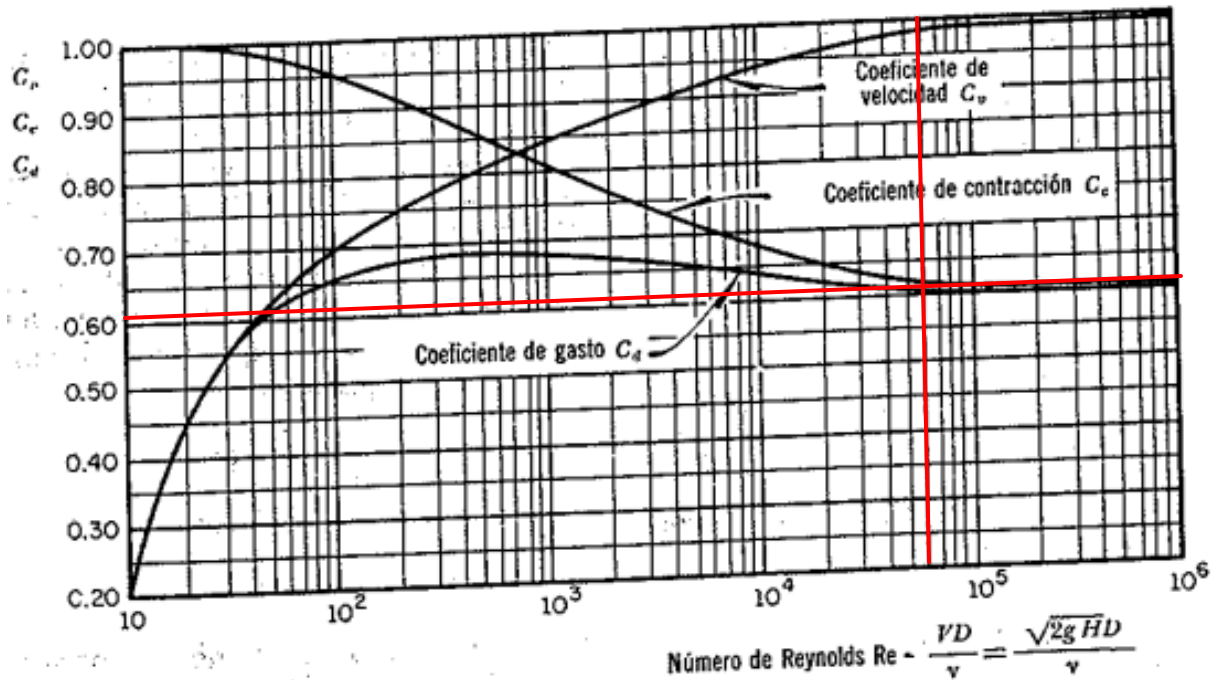


Figura 6. Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto, con el número de Reynolds en un orificio circular, Hidráulica General Volumen 1: Fundamentos, p. 208, 1997.

Canal derivador

Anteriormente, se ha planteado que la sección transversal que llevará el canal de derivación será trapecial, y previo a su dimensionamiento se establecieron algunas propiedades para las cuales se encontró su tirante normal por medio de tanteos.

Dado que se conoce el caudal a derivar, la velocidad; además del ancho de plantilla y talud propuestos, el tirante normal se puede obtener mediante una ecuación cuadrática obtenida a partir de la fórmula para el cálculo del área en canales con sección trapecial, como se muestra a continuación.

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{0.8 \text{ m/s}} = 1.25 \text{ m}^2$$

$$ky^2 + by = A ; (0.5)y^2 + (1.35\text{m})y - (1.25\text{m}^2) = 0$$

Para la ecuación cuadrática obtenida se tuvieron dos raíces, posibles soluciones para el tirante normal las cuales fueron:

- $y_1 = 0.729\text{m}$
- $y_2 = -3.429\text{m}$

Descartando la raíz negativa, se tiene que el tirante normal en el canal derivador es de **0.729m**.

Con el tirante normal, el ancho de plantilla y el talud conocidos, es posible calcular el perímetro mojado, radio hidráulico y pendiente directamente

$$P = b + 2y\sqrt{1 + k^2} = 1.35 + 2(0.729)\sqrt{1 + 0.5^2} = \mathbf{2.980m}$$

$$Rh = \frac{A}{P} = \frac{1.25m^2}{2.980m} = \mathbf{0.419m}$$

$$S = \left(\frac{V * n}{Rh^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = \left(\frac{0.8 * 0.015}{0.419^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = \mathbf{0.0005}$$

A continuación se presenta un esquema con los resultados obtenidos para el canal derivador. En el Anexo II y III se encuentran los planos topográficos y el generado para el canal derivador respectivamente, donde se detallan las rasantes del canal.

ESQUEMA GENERAL (ACOTACIONES EN METROS)

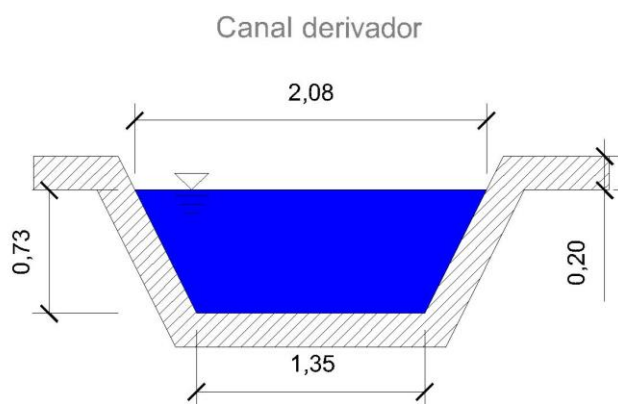


Figura 10. Esquema general del canal derivador, *Elaboración propia*, 2021.

Tabla 1. Especificaciones del canal derivador.

Tirante normal = 0.729 m
Ancho de plantilla = 1.350 m
Talud = 0.5
Sup. Libre del agua = 2.079 m
Bordo Libre= 0.200 m
Longitud del canal= 38.800 m
Revestimiento= Concreto, $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$
Pendiente= 0.0005

Canal desarenador

Para encontrar el tirante normal en el canal desarenador, se estableció una cota de referencia arbitraria, que a su vez servirá de referencia para obtener el tirante mínimo en el canal utilizado para iterar, y encontrar el tirante normal.

$$Z_{\text{Sup.libre en el desarenador}} = Z_{\text{fondo del canal derivador}} + y_{\text{derivador}} + H_{\text{obra de toma}}$$

$$Z_{\text{Sup.libre en el desarenador}} = 100m + 0.729m + 0.13m = 100.859m$$

$$Y_{\text{Min.en el desarenador}} = Z_{\text{Sup.libre en el desarenador}} - Z_{\text{fondo del canal derivador}} + \Delta_Z$$

$$Y_{\text{Min.en el desarenador}} = 100.859m - 100m + 0.20m = \mathbf{1.059m}$$

El tirante normal se encontró a partir del área necesaria para el caudal de derivación (1m³/s) y de la velocidad de sedimentación, y dado que el intervalo recomendado se encuentra entre 0.5 y 0.3 m/s, se propuso una velocidad en el canal de 0.35 m/s.

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{0.35 \text{ m/s}} = \mathbf{2.857 \text{ m}^2}$$

Con el área transversal y el tirante mínimo, se estableció un ancho de plantilla aproximado.

$$b = \frac{2.857m^2}{1.059m} = 2.698m$$

Como ya se ha establecido anteriormente, el ancho del canal debe ajustarse a una dimensión que permita la instalación de compuertas comerciales. Para asegurar que el nuevo tirante sea mayor al mínimo, el nuevo ancho de plantilla deberá ser menor a 2.698m, por lo que se propuso **2.00m**.

$$y = \frac{2.857m^2}{2.00m} = \mathbf{1.429m}$$

Dado que el nuevo tirante para un ancho de compuerta comercial es mayor al tirante mínimo, este se acepta y termina el proceso iterativo.

Para este tirante, la separación existente entre el fondo del canal y la obra de toma resultó de 0.57m, siendo superior a los 0.20m mínimos.

$$\Delta_Z = Y_n - Z_{\text{Sup.libre en el desarenador}} + Z_{\text{fondo del canal derivador}}$$

$$\Delta_Z = 1.429m - 100.859m + 100m = \mathbf{0.570m}$$

Con las visitas realizadas a la zona de estudio y con la experiencia de los agricultores y ejidatarios que trabajan las parcelas, se tuvo como dato el tipo de sedimento que transporta el canal proveniente del Desagüe General del Valle es arena (cuarzo), con un diámetro promedio de partícula de 1.5mm, y un peso específico promedio de 2650 kg/m³, siendo la relación de pesos específicos de 1.65.

$$\Delta = \frac{1000\text{kg/m}^3 - 2650 \text{ kg/m}^3}{1000\text{kg/m}^3} = \mathbf{1.65}$$

Previo al cálculo de la velocidad de caída de las partículas, se calculó F1:

$$F1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g\Delta Dp^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{g\Delta Dp^3}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36(1.007 \times 10^{-6})^2}{(9.81)(1.65)(0.002)^3}} - \sqrt{\frac{36(1.007 \times 10^{-6})^2}{(9.81)(1.65)(0.002)^3}} = 0.791$$

Sustituyendo $F1$, Δ y el diámetro promedio de la partícula en la ecuación de Rubey, para el cálculo de la velocidad de los sedimentos se tiene lo siguiente.

$$W_c = F1\sqrt{g\Delta Dp} = 0.791\sqrt{(9.81)(1.65)(0.002)} = \mathbf{0.123\ m/s}$$

Con la velocidad de caída de las partículas y el caudal de derivación, se estableció el área longitudinal mínima en el canal.

$$A_L = \frac{Q}{W_c} = \frac{1\text{m}^3/\text{s}}{0.123\text{m/s}} = 8.113\text{m}^2$$

Mientras que la longitud mínima de sedimentación en el canal, en función del ancho de plantilla establecido y del área longitudinal mínima es la siguiente:

$$L_s = \frac{A_L}{b} = \frac{8.113\text{m}^2}{2\text{m}} = 4.056\text{m}$$

Y adicionándole a esta longitud un porcentaje de seguridad, el diámetro de la obra de toma y la longitud que existirá entre la obra de toma y la compuerta se tiene que la longitud mínima en el canal será la siguiente:

$$L_{\min} = [L_s + 20\%] + \text{Diam}_{\text{Bocatoma}} + \text{Long. entre compuerta y bocatoma}$$

$$L_{\min} = [4.056\text{m} + 20\%] + 0.635\text{m} + 0.30\text{m} = \mathbf{6.438\text{m}}$$

A continuación se presenta un esquema con los resultados obtenidos para el canal derivador. En el Anexo II y IV se encuentran los planos topográficos y el generado para el canal desarenador respectivamente, donde se detallan las rasantes del canal.

ESQUEMA GENERAL (ACOTACIONES EN METROS)

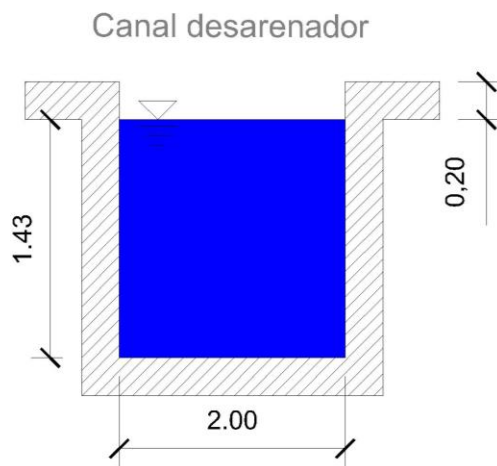


Tabla 2. Especificaciones del canal desarenador

Tirante normal =	1.429 m
Ancho de plantilla =	2.000 m
Sup. Libre del agua =	2.000 m
Bordo libre =	0.200 m
Longitud del canal=	6.438 m
Revestimiento=	Concreto, $f'c=210\text{ kg/cm}^2$
Pendiente=	0.0001

Figura 11. Esquema general del canal desarenador, *Elaboración propia*, 2021.

Cimacio

El gasto en el desagüe general obtenido en el aforamiento realizado en campo con base en la velocidad con la que un objeto de referencia cruzó por dos puntos de control, y el área promedio obtenida a partir del área de cada uno de estos mismos puntos de control fue de 1.865 m³/s. Ya que de este caudal se va a extraer 1 m³/s, el caudal de diseño para el cimacio será de 0.865 m³/s.

Para poder diseñar el perfil del cimacio, es necesario conocer la carga hidráulica sobre la cresta del vertedor. Teniendo como dato el gasto, y definiendo previamente una altura de pared para el vertedor de 2.70m con un ancho de corona de 3.90m, se iteró en la siguiente ecuación hasta lograr que, para un valor de Hv, se cumpla la igualdad.

$$\left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{Hv + 0.0011}{2.70} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{Hv} \right]^{\frac{3}{2}} * H_v^{\frac{3}{2}} = \frac{3(0.865)}{2\sqrt{2(9.81)} * 3.90} = 0.7509$$

Tras algunas iteraciones, la carga para la cual se logró cumplir la igualdad fue de **0.246m**.

$$\left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{0.246 + 0.0011}{2.70} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{0.246} \right]^{\frac{3}{2}} * 0.246^{\frac{3}{2}} = 0.7509$$

Con la carga Hv obtenida se generó el perfil del vertedor, proponiendo incrementos en el eje X de 10cm. $y = 0.5 \frac{x^{1.85}}{Hv^{0.85}}$; $y' = P - y$

X (m)	Y (m)	Y' (m)
0	0.000	2.700
0.1	0.023	2.677
0.2	0.084	2.616
0.3	0.177	2.523
0.4	0.302	2.398
0.5	0.457	2.243
0.6	0.640	2.060
0.7	0.851	1.849
0.8	1.090	1.610
0.9	1.355	1.345
1	1.646	1.054
1.1	1.964	0.736
1.2	2.307	0.393
1.3	2.675	0.025
1.31	2.700	0.000

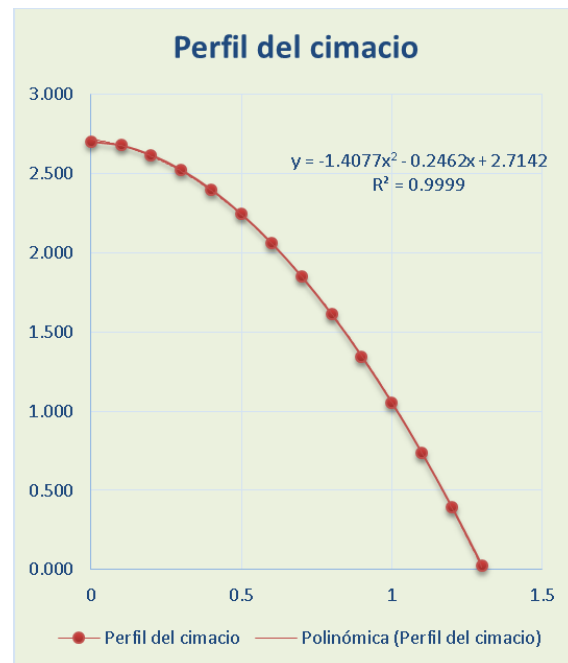


Figura 12. Perfil del cimacio,
Elaboración propia, 2021.

Longitud del salto hidráulico

En primera instancia, se calculó el tirante crítico en el canal, con la ecuación para canales rectangulares.

$$Y_c = \left[\frac{0.85^2}{(9.81)(3.90)^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.171m$$

Mientras que la velocidad para este tirante es:

$$V = \frac{Q}{y * b} = \frac{0.865}{0.171 * 3.90} = 1.296 \text{ m/2}$$

Como se comentó anteriormente, para calcular los conjugados mayor y menor se establecieron algunos puntos de control.

El punto de control “0”, se ubicó en la pared del vertedor aguas arriba, donde el tirante es la suma de la altura de la pared vertical del vertedor y la carga hidráulica (P+Hv). Al pie del cimacio se estableció el punto de control “1”, donde se ubicará el conjugado menor.

$$E = Z_0 + Y_0 + \frac{V_0^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + 1.1 \frac{\left(\frac{Q}{Y_1 * b} \right)^2}{2g}$$
$$E = 0 + 2.946 + \frac{1.296^2}{2(9.81)} = 0 + Y_1 + 1.1 \frac{\left(\frac{0.865}{Y_1 * 3.90} \right)^2}{2(9.81)} = 2.947$$

Iterando el valor de Y1 en la expresión anterior se tuvo que el conjugado menor que cumple con la igualdad es de **0.031m**

Calculando el número de Froude para este tirante se tiene:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{\left(\frac{Q}{y * b} \right)}{\sqrt{gy}} = \frac{\left(\frac{0.865}{(0.031 * 3.0)} \right)}{\sqrt{(9.84)(0.031)}} = 13.132$$

Conocido el conjugado menor y su número de Froude, se calculó el conjugado mayor.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_{r1}^2} - 1 \right]$$

$$Y_2 = Y_1 \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8(13.132)^2} - 1 \right] = \mathbf{0.556m}$$

Con los conjugados mayor y menor fue posible calcular la longitud del salto hidráulico, para el cual se calculó con tres ecuaciones que servirán de referencia entre sí para seleccionar la más conveniente.

- Silvester: $Lj/y_1 = 9.75(F_1 - 1)^{1.01}$; $Lj=3.73\text{m}$
- Peterka: $Lj/y_2 = 3.491 + 0.73F_1 - 0.06F_1^2 + 0.001441F_1^3$; $Lj=17.40\text{m}$
- Smentana-Tizon: $Lj/y_1 = 6[(y_2/y_1) - 1]$; $Lj=3.145\text{m}$.

Finalmente, se eligió la longitud de salto de **3.73m**, obtenida con la ecuación de Silvester debido a que proporciona un valor intermedio entre las tres ecuaciones calculadas.

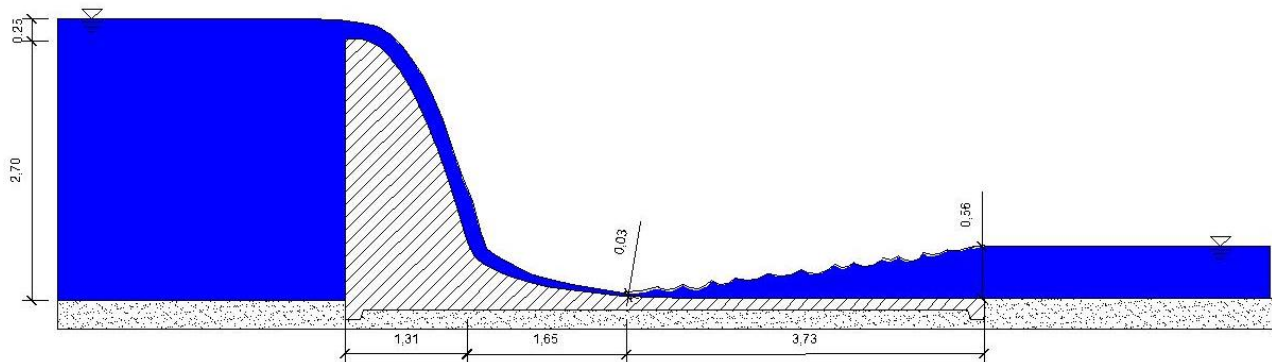


Figura 13. Esquema del cimacio (perfil), *Elaboración propia*, 2021.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este proyecto de tesis se logró exponer el problema que representa el cambio climático para la calidad de vida humana, y que como consecuencia de la explotación insostenible del agua a lo largo del tiempo, este recurso se está agotando provocando que cada vez sea más difícil obtenerlo.

En el distrito de riego 061 de Zamora, se viene lidiando con sequías desde hace algunos años en temporada de estiaje; y ante la necesidad de aprovechar eficientemente este recurso como parte vital de la economía de la región, en esta tesis se ha logrado aportar un sistema de racionamiento del agua con la que ya se cuenta en el distrito, a través de una presa derivadora que se ha diseñado hidráulicamente para proporcionar un caudal extra de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ para el riego parcelario de los módulos III y IV del distrito en las zonas más afectadas por sequías, logrando así solventar el problema de abastecimiento.

Tras haber desarrollado este proyecto de investigación se ha evidenciado que el factor humano es el principal potenciador para el agotamiento de los recursos naturales, es por ello que considero necesario implementar programas sociales que fomenten la cultura del cuidado del agua para agricultores, además de proponer programas de tandeos para el consumo de agua en el riego parcelario.

BIBLIOGRAFÍA

- Estrada Porrúa, M. (2001). Cambio climático global: causas y consecuencias. *INEGI. Notas, revista de información y análisis No.16*, 7-17.
- Fuijii, G. (2000). La agricultura, la agroindustria y la restricción externa al crecimiento económico de México. *Problemas del desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía: Vol. 31 Núm. 122*.
- González E., M., Jurado, E., González E., S., Aguirre C., Ó., Jiménez P., J., & Navar, J. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia UANL Vol. VI, No. 3*, 377-386.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Zamora, Michoacán*. México: INEGI.
- Martínez Menes, M., Fernández Reynoso, D., Ramírez Cruz, H., Medina Martínez, A., & Salas Martínez, R. (2017). *Diseño hidráulico y estructural de presas derivadoras*. México: SAGARPA, Subsecretaría de Desarrollo Rural, Dirección General de Producción Rural Sustentable en Zonas Prioritarias.
- Ortiz Paniagua, C. F., Bonales Valencia, J., & Aguirre Ochoa, J. (2016). Cambio climático y vulnerabilidad agrícola municipal en Michoacán. *21° Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México.*, 1-24.
- Palerm Viqueira, J. (2020). Caracterización de los módulos de los distritos de riego y presencia de organizaciones locales. *Región y sociedad vol.32* *Hermosillo*.
- Pardo Buendía, M. (2007). El impacto social del Cambio Climático. *Panorama Social*, n°5: 22-35.
- Peritos, s. y. (2005). *Plan director para la modernización integral del riego en el Distrito de Riego 061 "Zamora"*. Michoacán: Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola - Gerencia de Distritos y Unidades de Riego.
- Sainz Santamaría, J., & Becerra Pérez, M. (2003). Los conflictos por el agua en México. *Gaceta Ecológica*, núm. 67, 61-68.
- Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidráulica General, Vol. 1*. México: Limusa.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales*. México: UNAM, Facultad de Ingeniería.

ANEXOS

Anexo I. Trabajo de campo



Figura 14. Trabajo de campo: Despalme de terreno, *Elaboración propia*, 2021.



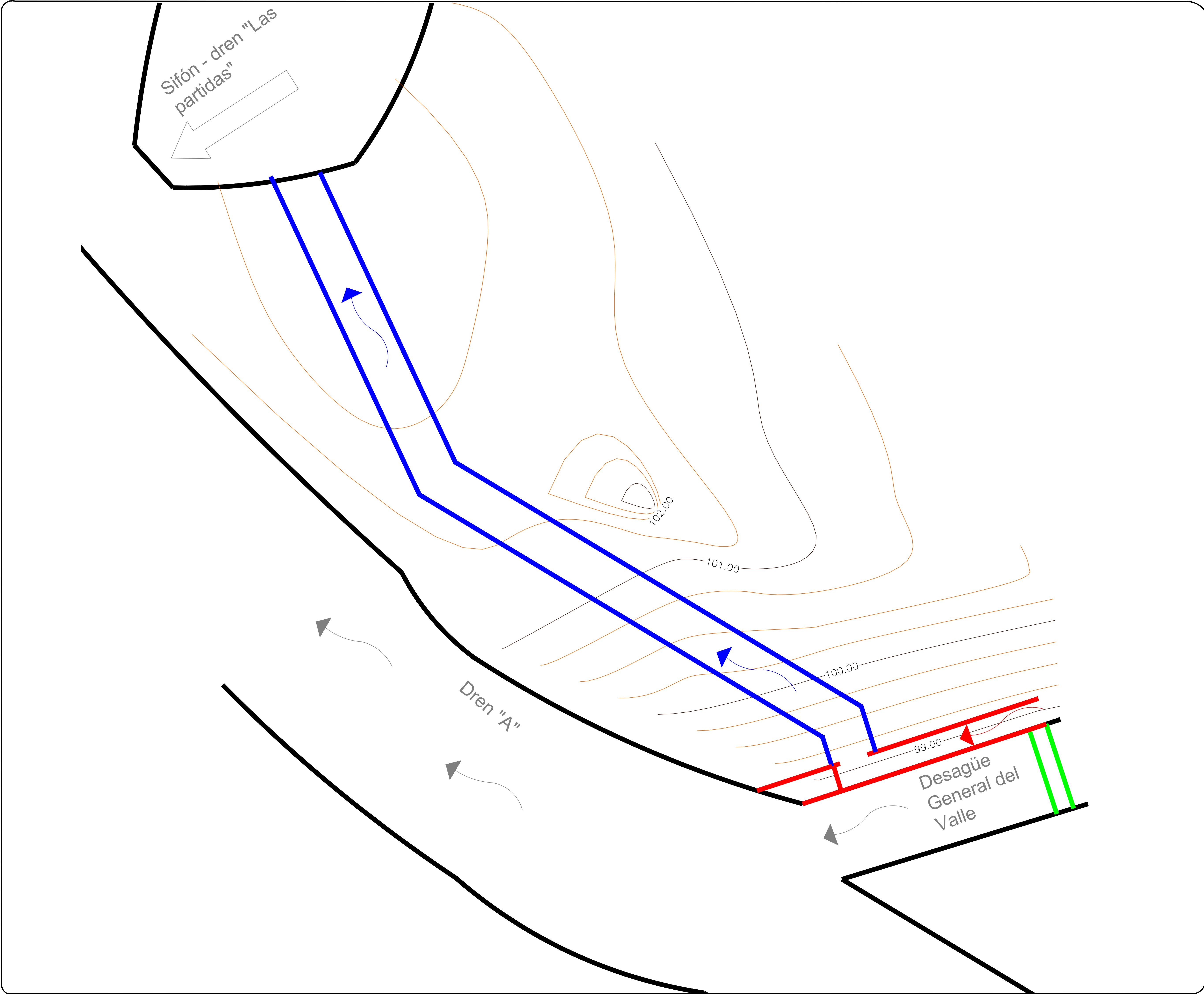
Figura 15. Trabajo de campo: Medición de la sección transversal de la entrada al sifón, *Elaboración propia*, 2021.



Figura 16. Trabajo de campo: Levantamiento topográfico, *Elaboración propia*, 2021.



Figura 17. Trabajo de campo: Estación total utilizada Leica TS06, *Elaboración propia*, 2021.



NORTE

CROQUIS DE UBICACIÓN

Macrolocalización: Zamora de Hidalgo, Mich.

Microlocalización: Ario de Rayón.

SIMBOLOGÍA

Curvas de nivel

Eje de canal derivador

Eje de canal desarenador

Eje del cimacio

Sentido del flujo

ELABORÓ

NOMBRE

MARIO ALBERTO MARISCAL OCHOA

DOMICILIO

ZAMORA DE HIDALGO, MICHOACÁN.

TELÉFONO

ESCALA GRÁFICA

0 5 10 15 20 25

UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO

FACULTAD DE
INGENIERÍA CIVIL

PLANO TOPOGRÁFICO

PLANO 1/4:

ANEXO II: PLANO QUE CONTIENE LA TOPOGRAFÍA DEL TERRENO Y LA PLANEACIÓN DE LA PRESA DERIVADORA.

UBICACIÓN

ZAMORA DE HIDALGO, MICHOACÁN.

CONTENIDO

DISEÑO HIDRÁULICO DE UNA PRESA DERIVADORA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL EN EL DISTRITO DE RIEGO 06 DE ZAMORA, MICHOACÁN.

REVISÓ

ESCALA

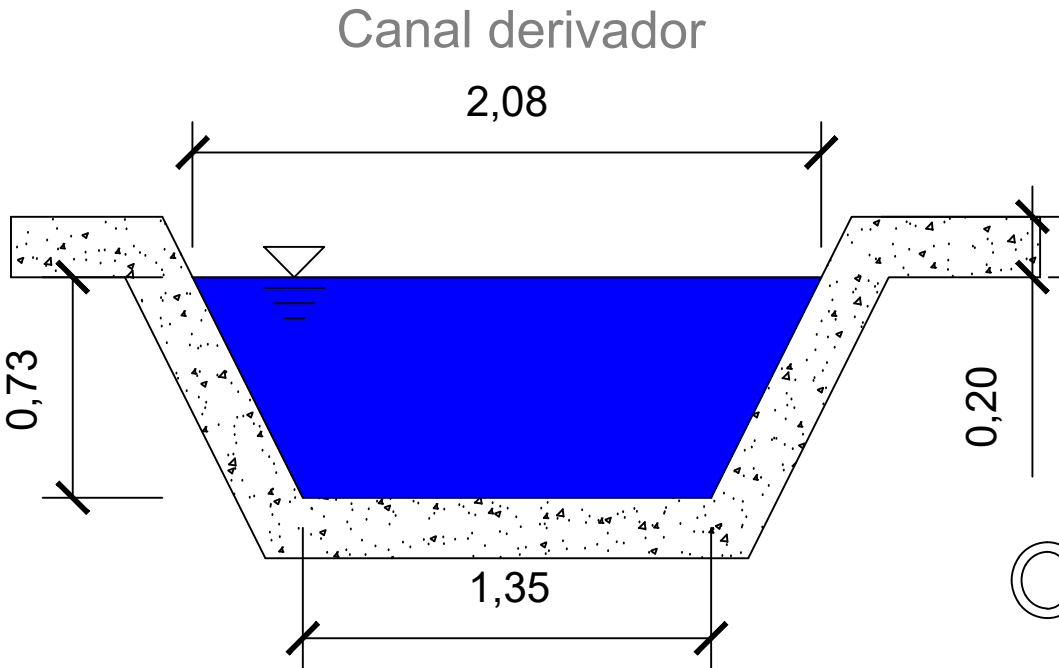
1:75

DOMICILIO

FECHA

NOVIEMBRE, 2021

ESQUEMA GENERAL
1:25

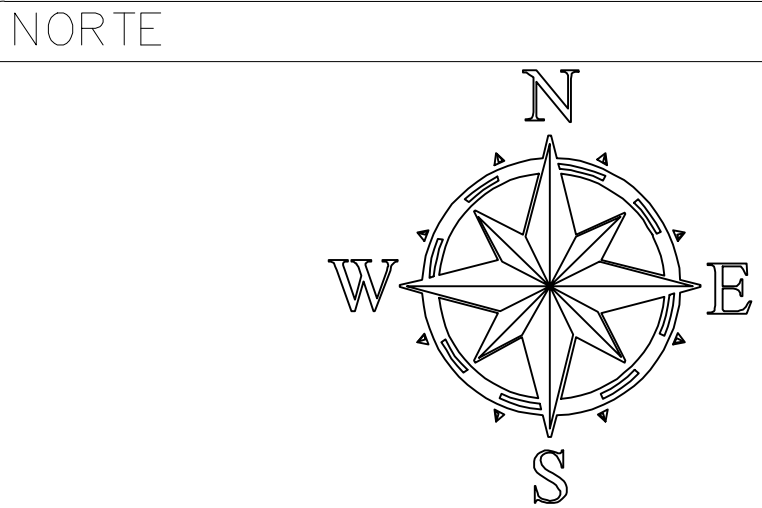
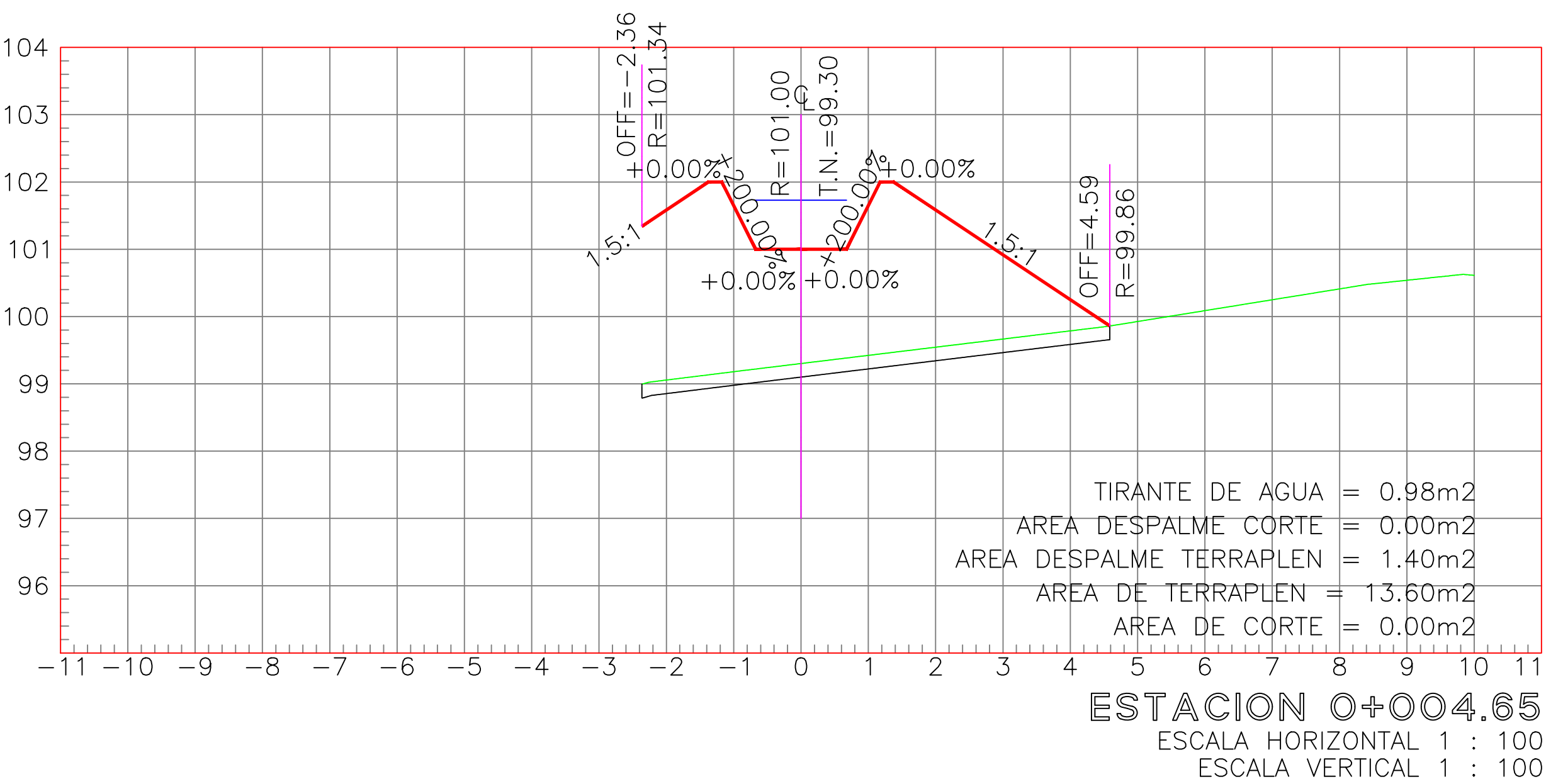
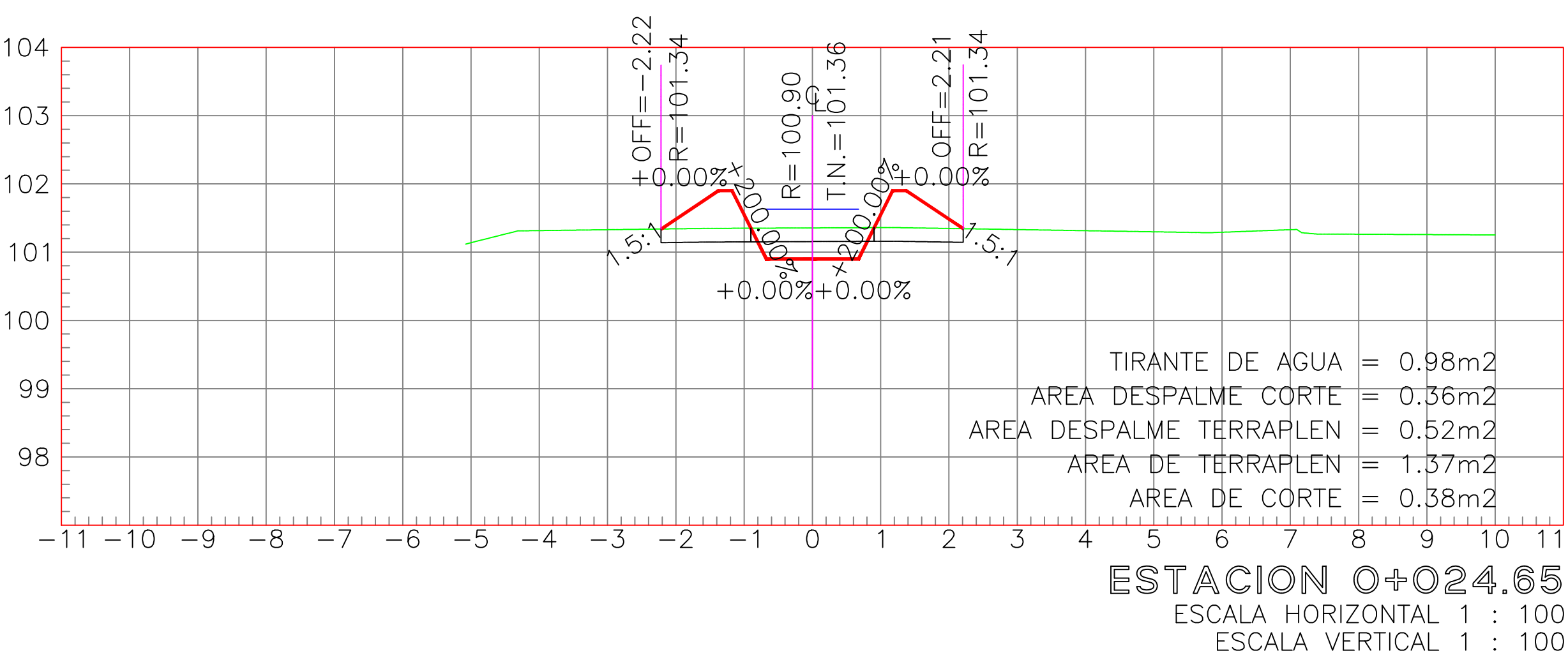
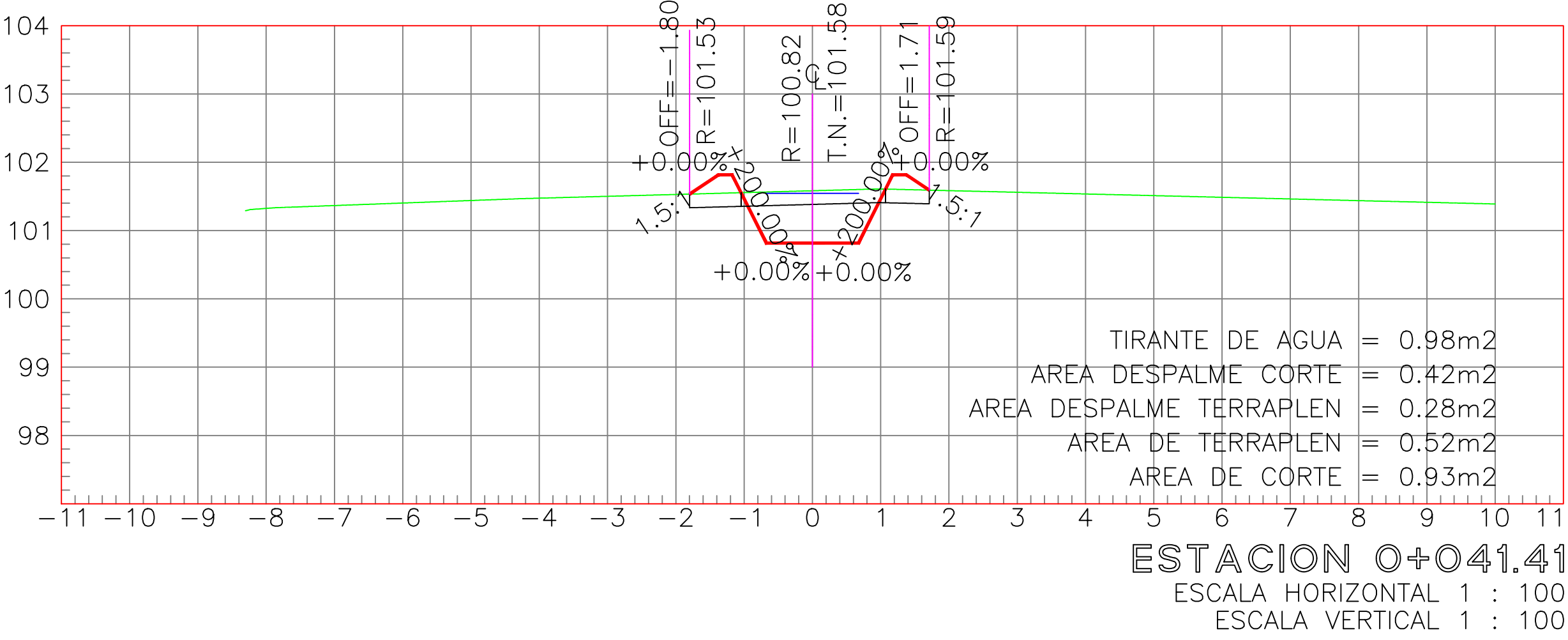
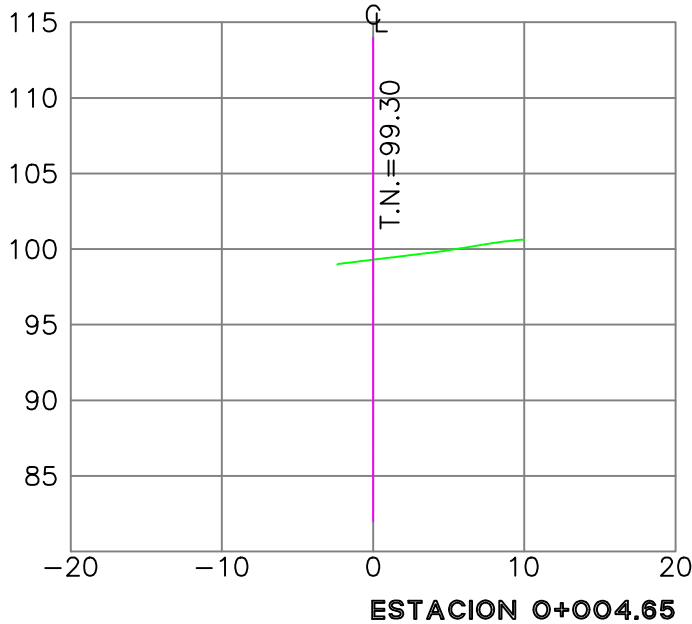
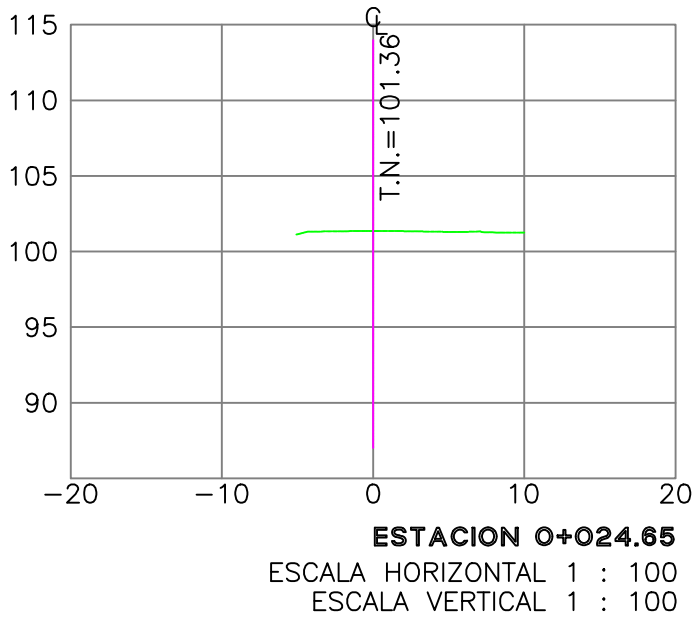
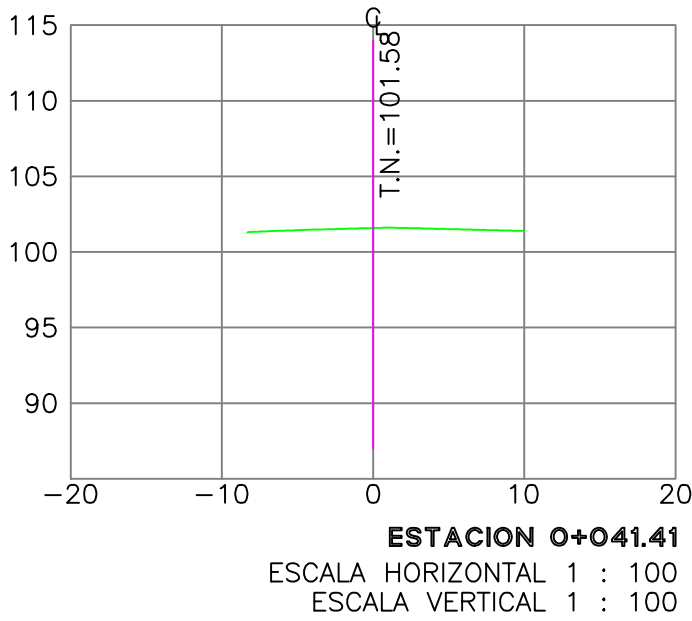
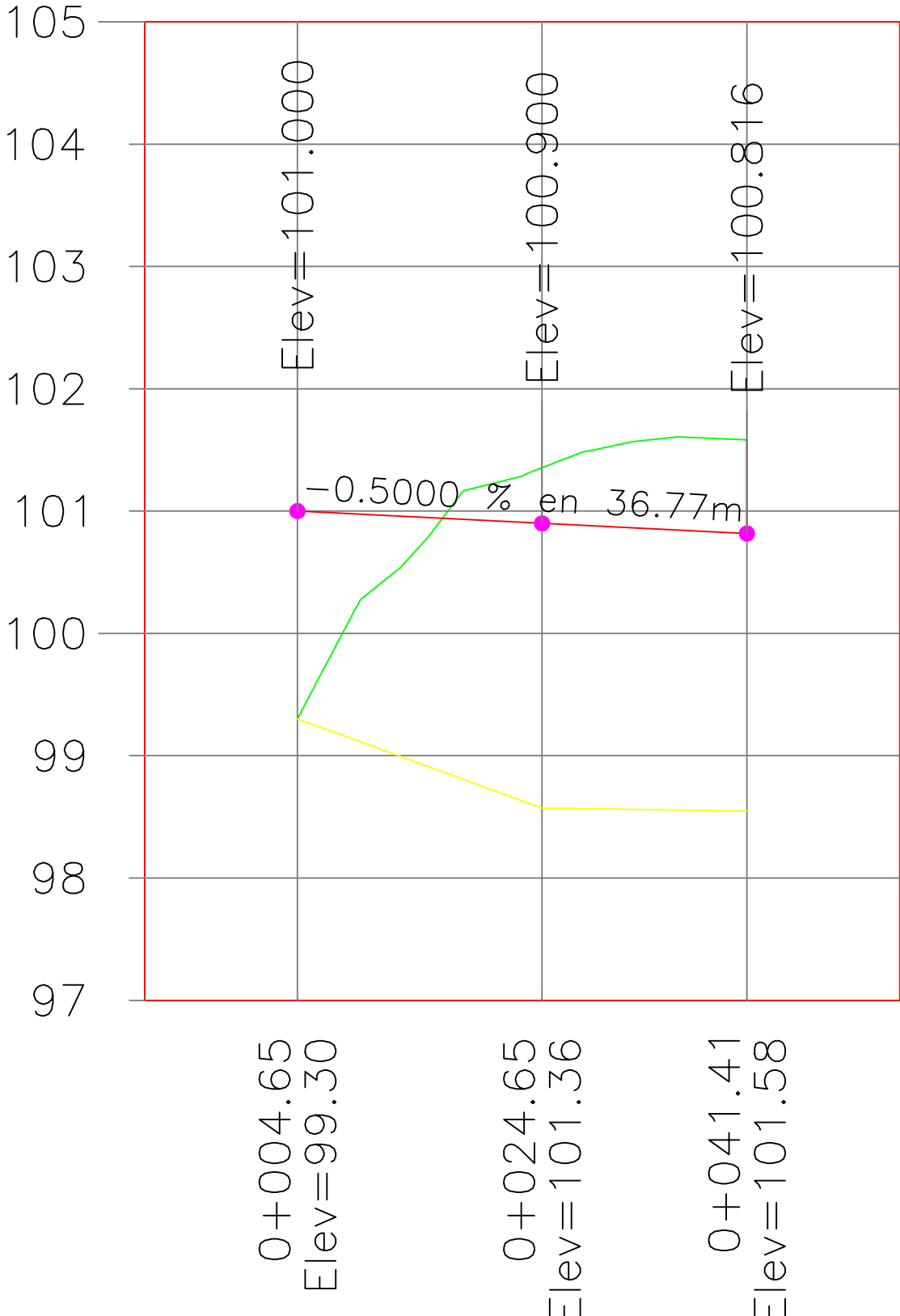


CANAL DERIVADOR

ESCALA HORIZONTAL 1 : 1000
ESCALA VERTICAL 1 : 100

ESCALA HORIZONTAL 1 : 1000
ESCALA VERTICAL 1 : 100
TOTAL VOLUMEN CORTE = 14.69m3
TOTAL VOLUMEN TERRAPLEN = -165.53m3
TOTAL VOLUMEN DESPALME EN CORTE = 10.18m3
TOTAL VOLUMEN DESPALME EN TERRAPLEN = -25.98m3

TIPO DE MATERIAL		A		
FACTOR DE ABUNDAMIENTO		1.000		
FACTOR DE COMPACTACION		1.000		
ORDENADAS DE LA CURVA MASA				
VOLUMEN	TERRAPLEN			
	CORTE			
ESPESOR	TERRAPLEN			
	CORTE			
ELEVACION	SUBRASANTE			
	TERRENO			



CROQUIS DE UBICACIÓN



SIMBOLOGIA.

- Eje del terreno natural.
- Eje propuesto del canal.
- Tirante de agua.
- Curva masa.

ESPECIFICACIONES DEL CANAL

GASTO: 1m3/s
TIRANTE NORMAL: 0.73m.
ANCHO DE PLANTILLA: 1.35m.
SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA: 2.08m.
BORDO LIRE: 0.20M.
LONGITUD DEL CANAL: 37.00m.
REVESTIMIENTO: CONCRETO (F'C=210 Kg/Cm2)
PENDIENTE: 0.0005

ELABORÓ

NOMBRE: MARIO ALBERTO MARISCAL OCHOA

DOMICILIO: ZAMORA DE HIDALGO, MICHOACÁN.

TELÉFONO:

ESCALA GRÁFICA: 0 5 10 15 20 25

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CANAL DERIVADOR

PLANO 2/4:

ANEXO III: PLANO QUE CONTIENE EL PERFIL Y SECCIONES TRANSVERSALES EN EL CANAL DERIVADOR.

UBICACIÓN: ZAMORA DE HIDALGO, MICHOACÁN.

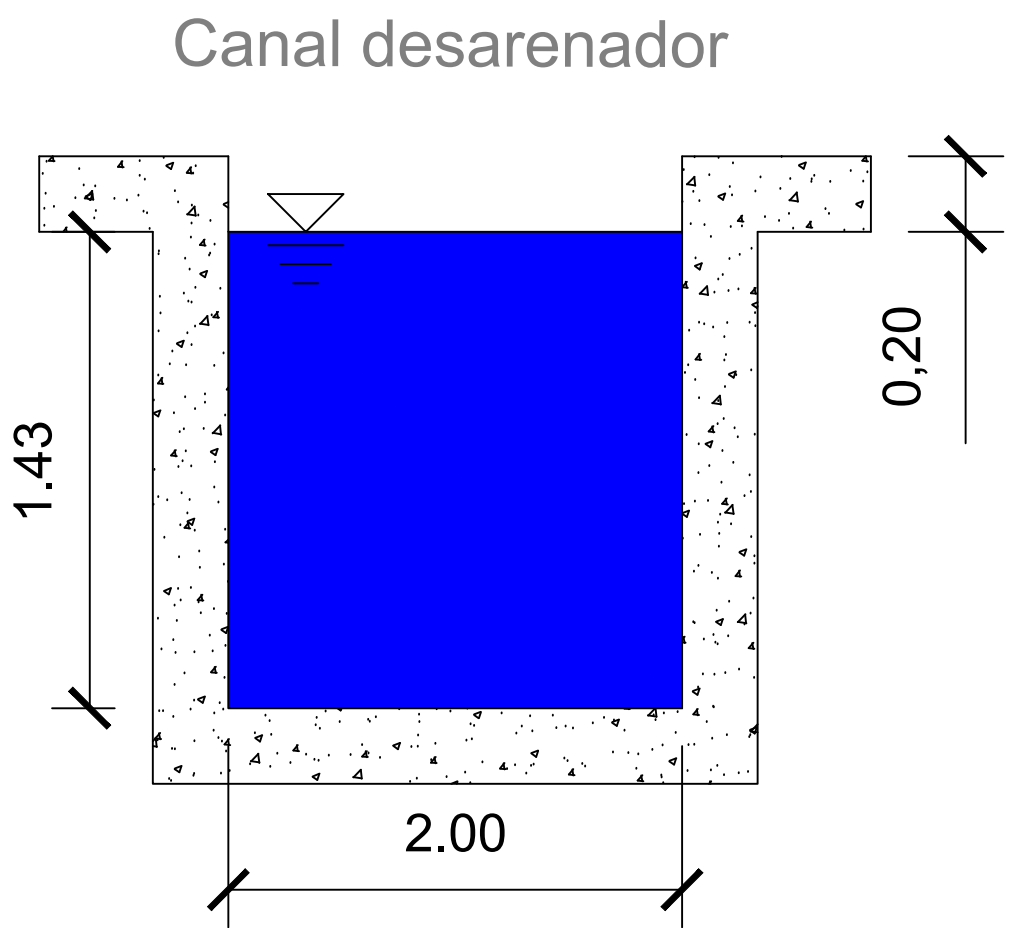
CONTENIDO:

REVISÓ:

ESCALA: 1 : 500

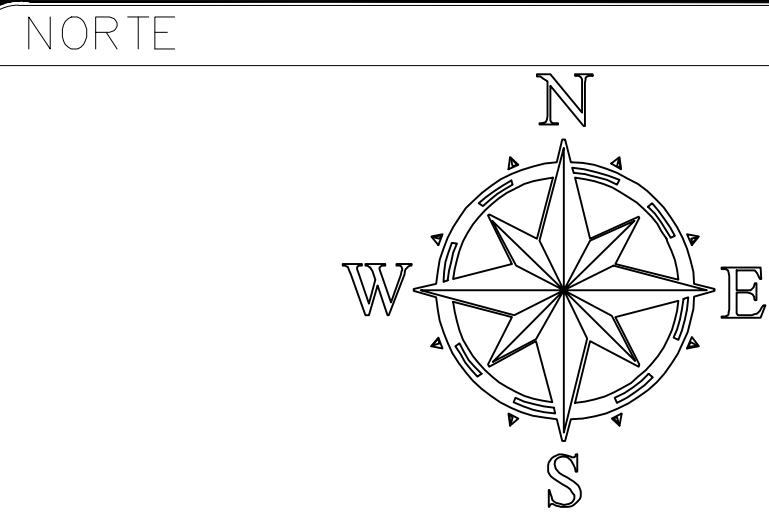
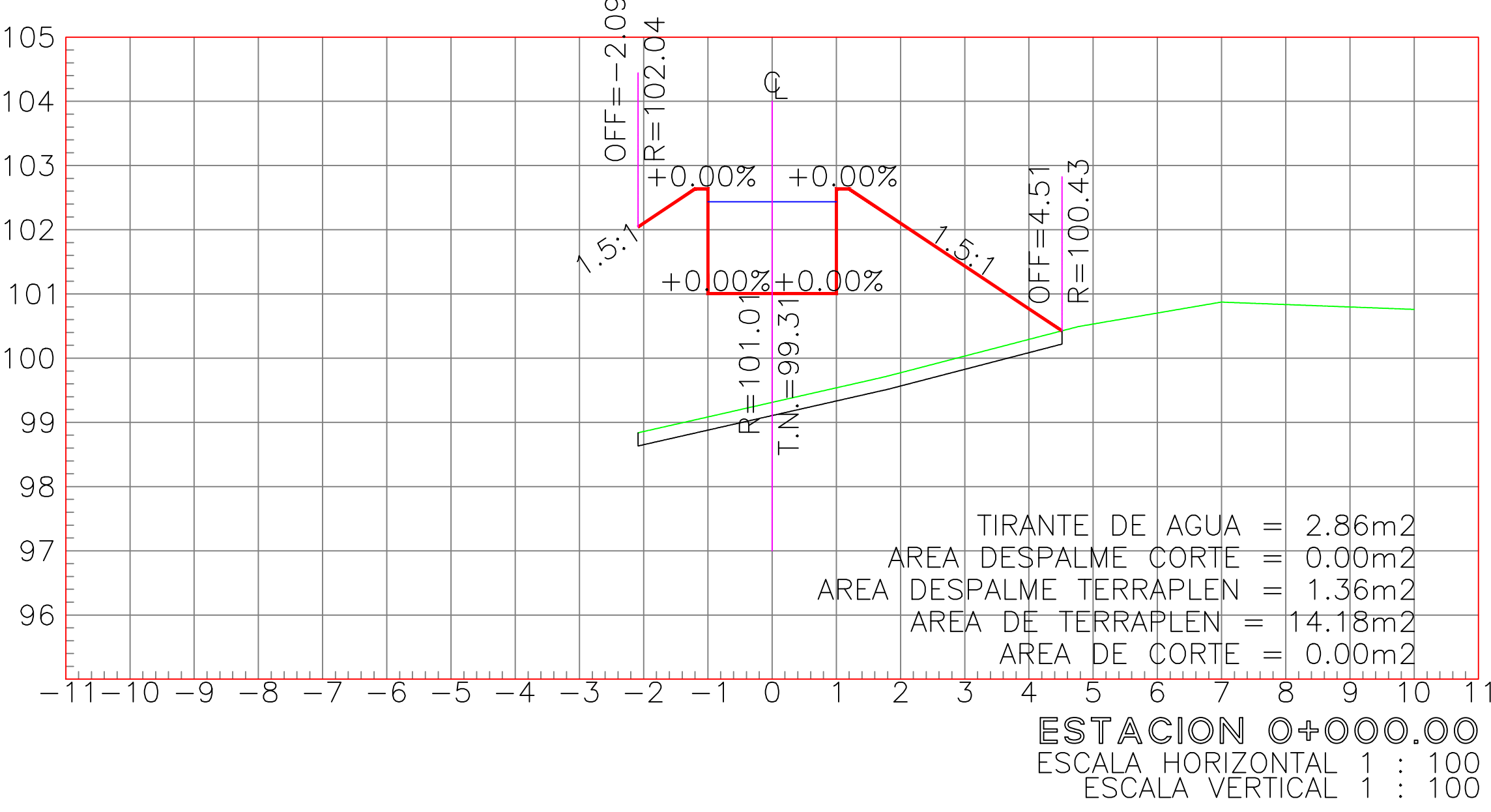
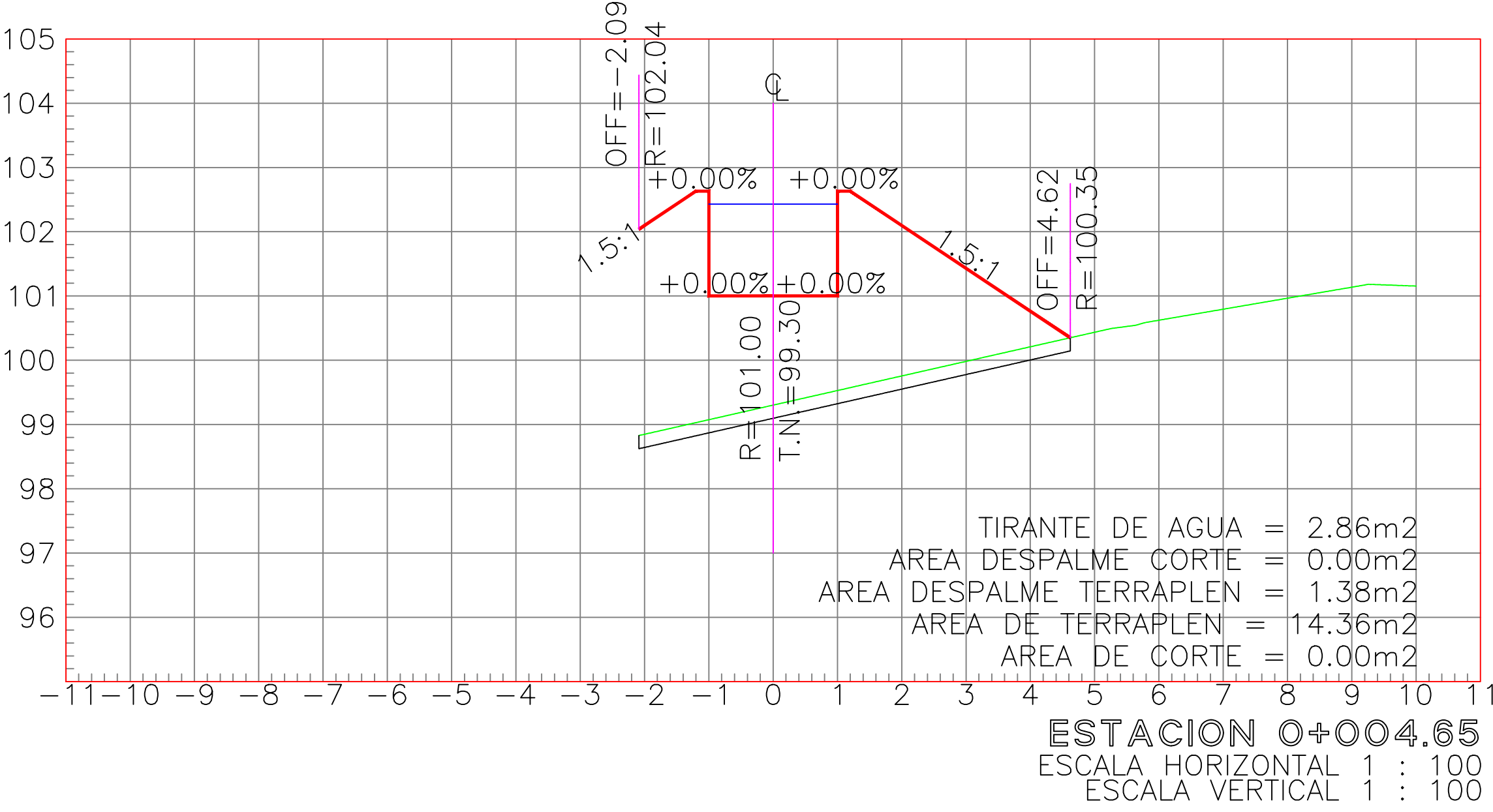
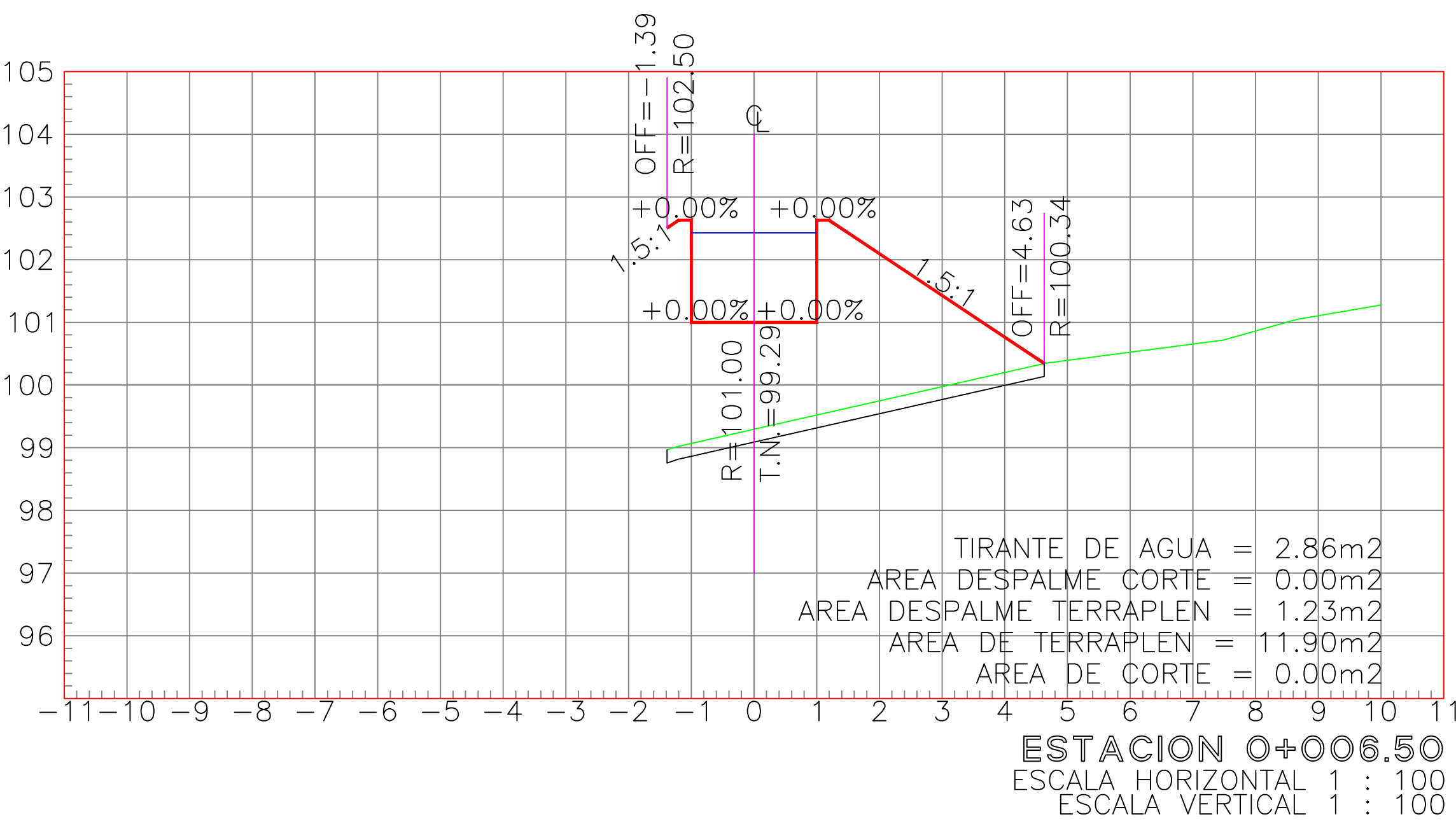
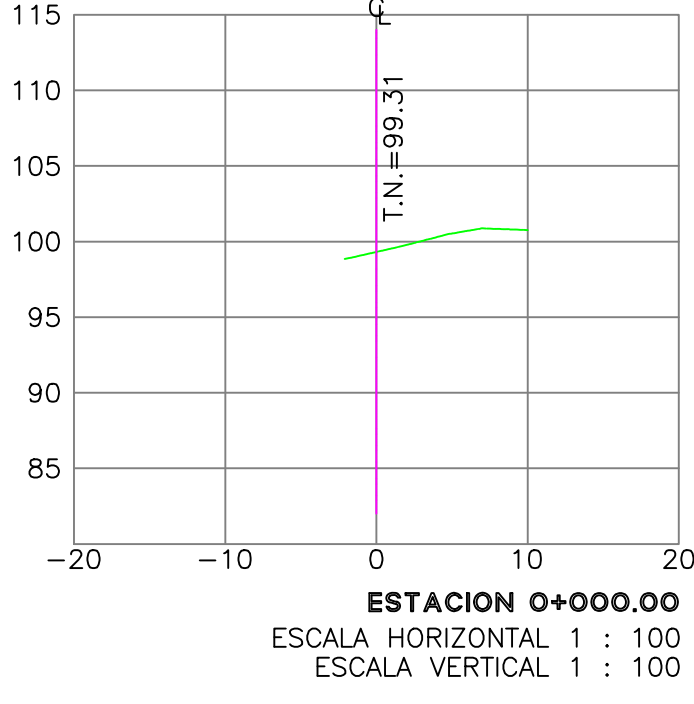
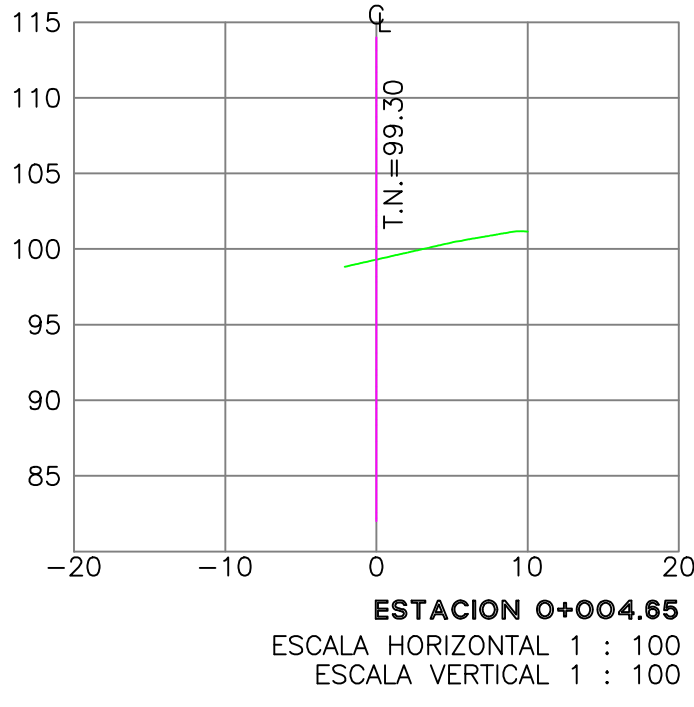
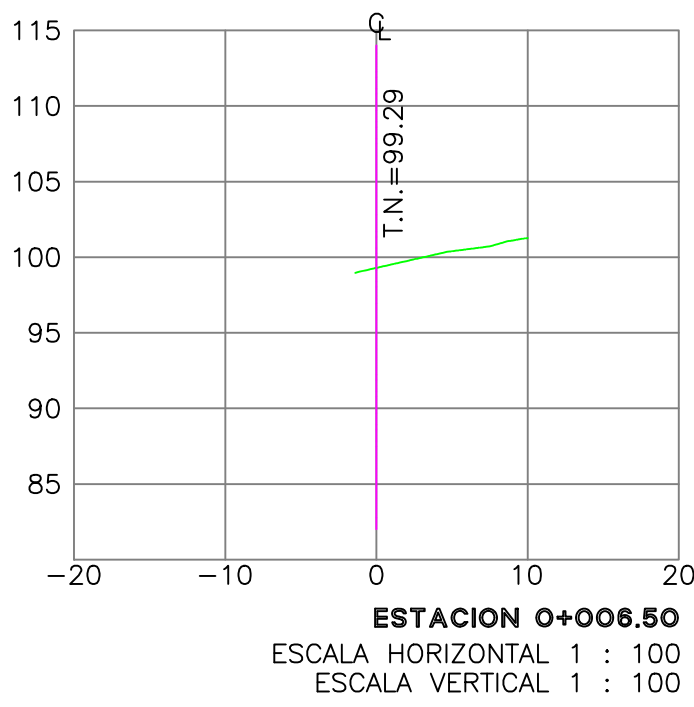
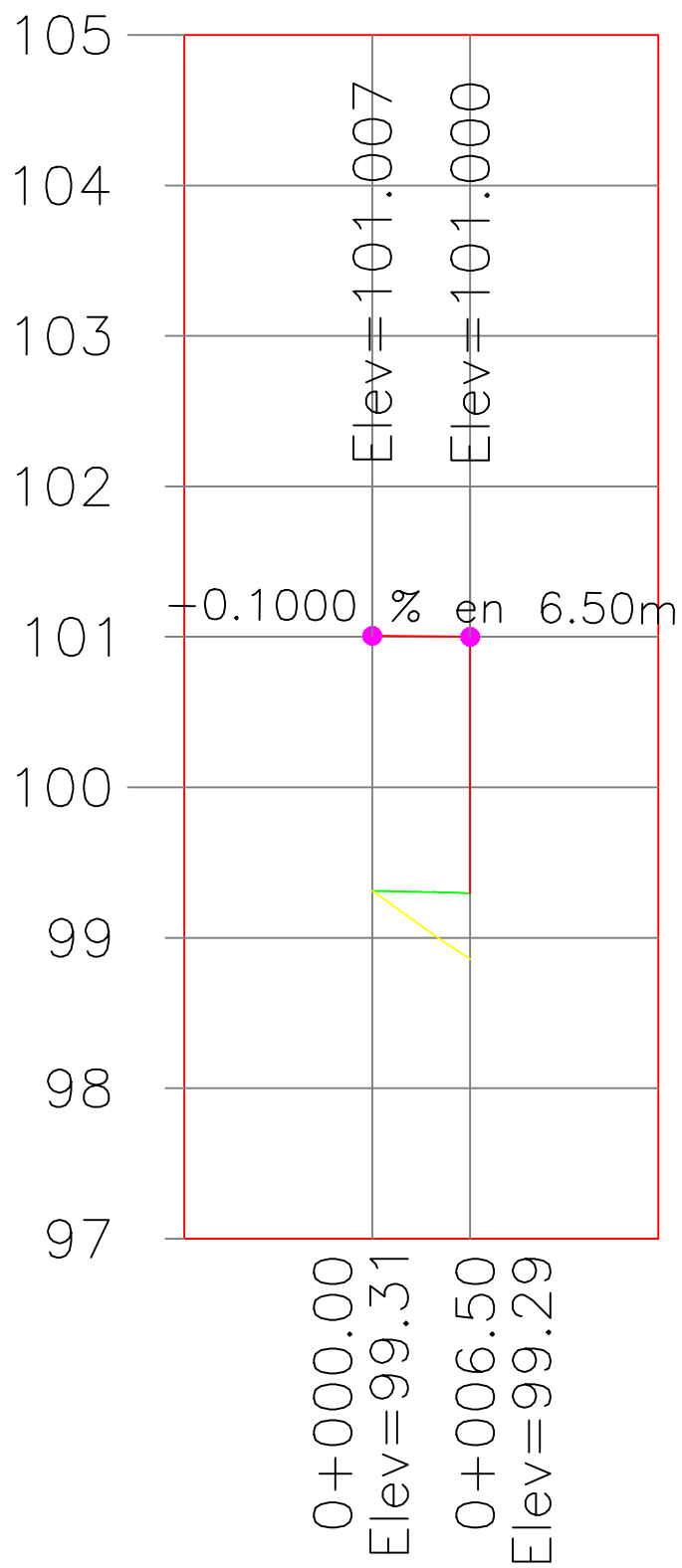
FECHA: NOVIEMBRE/2020

ESQUEMA GENERAL
1:20



CANAL DESARENADOR

ESCALA HORIZONTAL 1 : 1000
ESCALA VERTICAL 1 : 100



CROQUIS DE UBICACIÓN



SIMBOLOGÍA.

- Eje del terreno natural.
- Eje propuesto del canal.
- Tirante de agua.
- Curva masa.

ESPECIFICACIONES DEL CANAL

GASTO: 1m³/s
TIRANTE NORMAL: 1.43m.
ANCHO DE PLANTILLA: 2.00m.
SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA: 2.00m.
BORDO LIRE: 0.20m.
LONGITUD DEL CANAL: 6.50m.
REVESTIMIENTO: CONCRETO (F'C=210 Kg/Cm²)
PENDIENTE: 0.0001

ELABORÓ		ESCALA GRÁFICA
NOMBRE	MARIO ALBERTO MARISCAL OCHOA	
DOMICILIO	ZAMORA DE HIDALGO, MICHOACÁN	
TELÉFONO		

UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO



CANAL DESARENADOR

PLANO 3/4: ANEXO IV: PLANO QUE CONTIENE EL PERFIL Y SECCIONES TRANSVERSALES EN EL CANAL DESARENADOR.		DISEÑO HIDRÁULICO DE UNA PRESA DERIVADORA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL EN EL DISTRITO DE RIEGO 06 DE ZAMORA, MICHOACÁN.
UBICACIÓN	ZAMORA DE HIDALGO, MICHOACÁN.	
REVISÓ		CONTENIDO
DOMICILIO		ESCALA 1:500
		FECHA (NOVIEMBRE/2021)

ESCALA HORIZONTAL 1 : 1000
ESCALA VERTICAL 1 : 100
TOTAL VOLUMEN CORTE = 0.00m³
TOTAL VOLUMEN TERRAPLEN = -90.66m³
TOTAL VOLUMEN DESPALME EN CORTE = 0.00m³
TOTAL VOLUMEN DESPALME EN TERRAPLEN = -8.77m³

