



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS VERACRUZ

POSTGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

**EFICIENCIA HIDRÁULICA DE INYECTORES DE FERTILIZANTES DISEÑADOS
PARA AGROECOSISTEMAS CON SISTEMAS DE RIEGO DE BAJA PRESIÓN**

ARTURO GARCÍA SALDAÑA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

TEPETATES, MANLIO FABIO ALTAMIRANO, VERACRUZ, MÉXICO

2014

La presente Tesis, titulada: **Eficiencia hidráulica de inyectores de fertilizantes diseñados para Agroecosistemas con sistemas de riego de baja presión**, realizada por el alumno: **Arturo García Saldaña**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
AGROECOSISTEMAS TROPICALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. CESÁREO LANDEROS SÁNCHEZ

ASESOR:



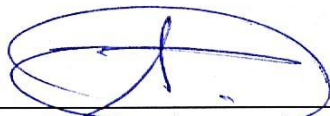
DR. JUAN PABLO MARTÍNEZ DÁVILA

ASESOR:



DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ

ASESOR:



DR. ARTURO PÉREZ VÁZQUEZ

ASESOR:



DR. EUGENIO CARRILLO ÁVILA

Tepetates, Manlio, F. Altamirano, Veracruz, 10 de octubre del 2014

EFICIENCIA HIDRÁULICA DE INYECTORES DE FERTILIZANTES DISEÑADOS PARA AGROECOSISTEMAS CON SISTEMAS DE RIEGO DE BAJA PRESIÓN

Arturo García Saldaña, MC.

Colegio de Postgraduados, 2014

En el Colegio de Postgraduados Campus Veracruz se han elaborado, en colaboración con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), los proyectos ejecutivos para la instalación de sistemas de riego de baja presión con tuberías de multicompuertas en los agroecosistemas con caña de azúcar del Estado de Veracruz, cuya eficiencia fluctúa entre 75 y 80 %. Como complemento a estos sistemas se requiere de un dispositivo para llevar a cabo la fertirrigación. Debido a esto, el presente trabajo tuvo como objetivo identificar el ángulo convergente, ángulo divergente, los diámetros de garganta y la carga de presión hidráulica que hacen eficiente a un inyector de fertilizante tipo Venturi que puede ser empleado en estos sistemas de riego. Para esto, se diseñaron 20 prototipos de inyectores de fertilizante tipo Venturi, cuyo funcionamiento se basa solamente en la energía del sistema (cargas de presión hidráulicas). Éstos se modelaron en tercera dimensión (3D) y se evaluaron mediante simulación con un software de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Posteriormente se seleccionó el que demostró mayor eficiencia hidráulica en las simulaciones para su posterior implementación y validación en un agroecosistema con caña de azúcar. Se definieron las características físicas del inyector: diámetros de entrada y salida de 6", el diámetro de garganta de 3" y diámetro en el puerto de succión de fertilizante de 2". Los ángulos convergente y divergente con mejor desempeño fueron de 7.5° y 10°. Estos ángulos se pueden utilizar para la construcción de inyectores de fertilizantes tipo Venturi en agroecosistema con sistemas de riego de baja presión por multicompuertas.

Palabras clave: Inyectores, Venturi, fertirrigación, multicompuertas, agroecosistema.

HYDRAULIC EFFICIENCY OF FERTILIZER INJECTOR DESIGNED FOR AGROECOSYSTEMS WITH LOW PRESSURE IRRIGATION

Arturo García Saldaña, MC.
Colegio de Postgraduados, 2014

In the Graduate College Campus Veracruz, the executive projects for the installation of low pressure irrigation systems with multifloodgates pipes have been carried out, in collaboration with The National Water Commission (CNA), for sugar cane agroecosystems of the Veracruz State, whose efficiency ranges between 75 and 80 %. These irrigation systems requires a complimentary device to accomplish the fertigation process. Thus, the objective of this research work was to identify the convergent and divergent angles, throat diameters and the hydraulic head that make a Venturi fertilizer injector more efficient to be used in the referred low pressure irrigation systems. For this, 20 prototypes of Venturi fertilizer injectors were designed, whose functioning is based only on the energy of the system (i.e. hydraulic head). These were modeled in three dimensions (3D) and evaluated by means of simulation using a fluid dynamics computational software (CFD). Afterwards, the prototype that showed the best greatest hydraulic efficiency during the simulation process, which will be used for further implementation and validation in a sugarcane agroecosystem in a subsequent field research. The physical characteristics of the injector were defined: input and output diameters of 6 ", diameter throat 3" and a port diameter of the fertilizer suction of 2". The convergent and divergent angles with better performance were 7.5° and 10° angles. These can be used for building Venturi fertilizer injectors in agroecosystem with a low pressure irrigation.

Keywords: Fertilizer injectors, Venturi, fertigation, multifloodgates, agroecosystemDedicatoria

Dedicatoria

Dedico esta tesis a:

La Santísima Trinidad, que con su amor nos da la oportunidad de vivir y crecer en sabiduría e inteligencia, por permitir realizarme en el área de las Ciencias; y a nuestra Madre amorosa por su valiosa intercesión.

Dedico este esfuerzo también a mi madre, esposa e hijos, que son el motivo que me mueve a superarme cada día.

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente al Dr. Cesáreo Landeros Sánchez por su apoyo. A mi Consejo Particular, por acompañarme de la mano en esta etapa de mi formación.

A mis demás familiares; amigos y profesores de Maestría, por su apoyo incondicional. Al personal del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, por sus atenciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el financiamiento económico durante 2 años de estudio.

Al Instituto Tecnológico de Boca del Río en el área de Postgrado, por sus facilidades en la utilización de sus Laboratorios.

Al Colegio de Postgraduados y al FIDEICOMISO REVOCABLE DE ADMINISTRACIÓN E INVERSIÓN NO. 167304 PARA ESTABLECIMIENTO Y OPERACIÓN DE LOS FONDOS PARA LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL CENTRO PÚBLICO COLEGIO DE POSTGRADUADOS. Modalidad 3: “Financiamiento a proyectos de investigación de tesis”, por el financiamiento de este trabajo de investigación.

A la LPI-8 del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, Impacto y mitigación del climático.

A todos, mil gracias.

Contenido

	Página
Dedicatoria	v
Agradecimientos.....	vi
Lista de Cuadros	xi
Lista de Figuras.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	4
2.1 Teoría General de Sistemas (TGS).....	4
2.1.1 Sistemas.....	5
2.2 Agroecología	6
2.2.1 El Agroecosistema.....	7
2.3 Agroecosistemas con caña de azúcar.....	12
2.3.1 Historia del cultivo de caña de azúcar	12
2.3.2 Agroecosistema con caña de azúcar en México: características, superficie y tecnología.....	13
2.3.3 El cultivo de caña de azúcar en Veracruz.....	15
2.3.4 Sistemas de riego en el cultivo de caña de azúcar.....	16
2.4 Tipos de sistemas de riego.....	18
2.4.1 Los sistemas de riego de baja presión	20
2.4.2 El sistema de riego de baja presión por multicompuertas	21
2.5 Fertirrigación	22
2.5.1 Fertirrigación: Ventajas y Desventajas	22
2.6 Concepto de fluido, presión y caudal	23
2.7 Ecuación de continuidad	24
2.8 Número de Reynolds.....	25

2.9 Teorema de Bernoulli	26
2.10 Tubo Venturi.....	26
2.11 Inyector tipo Venturi	27
2.12 Definición de coeficiente de descarga.....	27
2.13 Definición de rendimiento del inyector Venturi	28
2.14 Definición de eficiencia de aplicación de fertilizantes.....	28
2.15 Simulación.....	29
3. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	30
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	34
4.1 Problema de investigación	34
5. HIPÓTESIS	35
5.1 General.....	35
5.2 Particulares	35
6. OBJETIVOS	36
6.1 General.....	36
6.2 Particulares	36
7. MARCO DE REFERENCIA.....	37
7.1 Módulo de Riego II-1 Actopan. Distrito de Riego 035.....	37
7.1.1 Localización.....	37
7.1.2 Hidrología	37
7.1.3 Clima	38
7.1.4 Suelos.....	38
7.2 Proyecto El Manzano	39
7.3 Ejido Arroyo de Piedra, Actopan, Ver.....	40
7.3.1 Localización.....	40

7.3.2 Población.....	40
7.4 Inyectores de fertilizantes.....	42
7.4.1 Inyector de fertilizantes tipo Venturi. Funcionamiento	42
7.4.2 Instalación	43
7.4.3 Diseño	43
7.4.4 Evaluación.....	44
7.4.5 Eficiencia	44
7.4.6 Construcción.....	45
7.4.7 Presión	46
7.4.8 Rendimiento	46
7.4.9 Succión del fertilizante.....	47
7.4.10 Simulación.....	47
7.4.11 Uniformidad en aplicación del fertilizante	48
8. MATERIALES Y MÉTODOS	49
8.1 Metodología.....	49
8.1.1 Estado del sistema de riego por multicompuertas	51
8.1.2 Diseño del prototipo.....	52
8.1.3 Matriz de diseño de los modelos	53
8.1.4 Simulación.....	55
8.1.5 Análisis de datos.	56
8.1.6 Construcción.....	57
8.2 Operacionalización de la hipótesis general	58
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
9.1 Cálculos.....	59
9.2 Simulaciones	60

9.2.1 Selección de prototipos	61
9.2.2 Pruebas con agua	64
9.3 Soluciones de fertilizante.....	64
9.3.1 Cálculo de soluciones para las dosis de fertilizante	65
9.3.2 Resultado del análisis de soluciones en laboratorio	65
9.3.3 Nomogramas de densidad Vs temperatura en muestras analizadas	66
9.4 Pruebas de simulación con soluciones de fertilizante	67
9.4.1 Comparación del agua Vs mezcla	67
9.4.2 Selección del prototipo a construir.....	68
9.5 Construcción	71
9.6 Discusión.....	71
10. CONCLUSIONES.....	73
11. LITERATURA CITADA.....	75
ANEXO A. Figuras y Cuadros complementarios	83
ANEXO B. Memoria fotográfica.....	90

Lista de Cuadros

		Página
Cuadro 1.	Distritos de Riego del Estado de Veracruz.....	17
Cuadro 2.	Clasificación de los sistemas de riego con base en el nivel de presión requerida en el emisor o hidrante.....	20
Cuadro 3.	Clasificación del nivel de ingresos económicos en la localidad de Arroyo de Piedra, Ver., según el número de salarios mínimos.....	41
Cuadro 4.	Valor de la relación de diámetros ($\beta=d/D$) en función de la longitud de tramo recto aguas arriba para la instalación de accesorios antes del inyector tipo Venturi.....	43
Cuadro 5.	Valor del diámetro (D) y relación de diámetros (β) para un inyector tipo Venturi.....	44
Cuadro 6.	Tabla de diseño utilizada en <i>SolidWorks</i> 2014 ® que define los modelos tridimensionales a evaluar en el simulador <i>SolidWorks FlowSimulator</i> 2014 ®.....	54
Cuadro 7.	Soluciones de las mezclas agua-fertilizante analizadas en laboratorio para determinar densidad, viscosidad y temperatura.....	56
Cuadro 8.	Indicadores para la operacionalización de la hipótesis general.....	58
Cuadro 9.	Resultados de las variables calculadas con las que se llevó a cabo el diseño de los prototipos y las simulaciones en <i>SolidWorks FlowSimulator</i> 2014 ®.....	59
Cuadro 10.	Tabla ANOVA de los 20 modelos de prototipos de inyectores simulados.....	62

Cuadro 11.	Agrupamiento de modelos de los prototipos de inyectores de fertilizante de acuerdo a sus medias de velocidad.....	63
Cuadro 12.	Dosis de soluciones para aplicación de fertilizantes recomendadas por hectárea por año en caña de azúcar para fertirriego.....	65
Cuadro 13.	Densidad calculada de las soluciones de fertilizante con base en la salinidad medida	66
Cuadro 14.	ANOVA con los factores Modelos, Temperatura y Soluciones con IC=99 %, donde se observan diferencias significativas en los factores Modelos y Temperaturas.....	70
Cuadro 15.	Prueba de Tukey aplicada a los 4 niveles del factor Modelos donde se muestra una diferencia significativa al 1 % entre niveles a favor del modelo M15.....	70

Lista de Figuras

		Página
Figura 1.	Modelo fusionado de los componentes y procesos del Agroecosistema.....	12
Figura 2.	Localización geográfica de ingenios en el Estado de Veracruz.....	16
Figura 3.	Situación problemática de un agroecosistema con caña de azúcar en la región centro del Estado de Veracruz.....	31
Figura 4.	Localización geográfica del ejido Arroyo de Piedra, Actopan, Ver.....	40
Figura 5.	Estructura interna del flujo en un inyector tipo Venturi.....	52
Figura 6.	Modelado en 3D de uno de los prototipos inyectores de fertilizante realizado con el software <i>Solidworks</i> 2014 ®.....	55
Figura 7.	Simulación del funcionamiento de un prototipo mediante el software <i>Solidworks FlowSimulator</i> 2014 ®.....	60
Figura 8.	Gráfica de comparación de medias de velocidades desarrolladas en cada uno de los modelos de los prototipos simulados.....	62
Figura 9.	Nomogramas de densidad de las soluciones de fertilizante analizadas en laboratorio incluidas en las simulaciones.....	66
Figura 10.	Comparación de medias de los prototipos con diferentes soluciones a diferentes temperaturas.....	68
Figura 11.	Comparación del promedio de velocidades con agua (--) y dosis de fertilizante (S1, S2 Y S3) a 20 °C.	69
Figura 12.	Resultados finales en la selección de los Modelos de prototipos inyectores.....	71

1. INTRODUCCIÓN

El planeta tierra está conformado por tres cuartas partes de agua y una cuarta parte de tierra aproximadamente. De la inmensa cantidad de agua en el planeta, el 97.5 % es agua salada presente en los océanos, y sólo el 2.5 % corresponde al agua dulce. Del total de agua dulce en el mundo poco más del 75 % está concentrada en los casquetes polares, el 21 % aguas subterráneas y el 4 % restante en lagos y ríos (CONAGUA, 2012).

En la actualidad, el uso de los recursos hídricos es un tema de interés mundial, por pasar de ser un recurso natural renovable, a uno prácticamente no renovable. Lo anterior visto desde la óptica de que cada vez los acuíferos se están contaminando por el uso excesivo de agroquímicos (Galaviz, 2010; Landeros *et al.*, 2012).

Una opción para recuperar la calidad y cantidad del recurso hídrico es el tratamiento y re-utilización de aguas residuales. Sin embargo, es importante promover una cultura del cuidado de la calidad del agua (Guerrero e Hilda, 2012) para disponer de una mayor cantidad y calidad de este recurso que podría utilizarse en otros sectores.

En México el sector agrícola consume 61.5 millones de m³ del recurso hídrico existente (76.6 %), el sector urbano 11.4 millones de m³ (14.3 %), el industrial 3.2 millones de m³ (4 %) y las termoeléctricas 4.07 millones de m³ (5.1 %) (SNIA, 2013).

El cultivo de la caña de azúcar consume aproximadamente 1,800 L de agua por kg de azúcar producido (Waterfootprint, 2010). Si se compara con el requerimiento de agua para producir un kilogramo de carne donde se necesitan 1,600 L (Waterfootprint, 2010), no existe diferencia significativa entre ambos. Esto indica que es necesario un aprovechamiento más eficiente del agua que resulte en mejores y mayores rendimientos por unidad de superficie en todos los sectores.

Algunos estudios han indicado que el consumo de agua para riego en caña de azúcar varía de 4 a 12 mm por día. Es decir, $40 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ a $120 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$.

Por otro lado, el consumo *per cápita* de azúcar en México en 2009 fue de 46.8 kg (SAGARPA, 2010). Esto hace necesario que el agua se utilice con mayor eficiencia en la producción de este satisfactor.

Para hacer eficiente el uso del agua se han desarrollado sistemas de riego de presión nula, de baja presión y de alta presión, los cuales permiten proveer de agua a los cultivos con eficiencias que van del 50 al 95 %. Los sistemas de riego de baja presión que utilizan tuberías alcanzan esta eficiencia, evitando pérdidas por evaporación, comunes en algunos otros sistemas de riego.

Los sistemas de riego con tuberías de baja presión por multicompuertas son paquetes tecnológicos mejorados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Utiliza una tubería de conducción principal, un hidrante o válvula de control y tubos con las multicompuertas mediante los cuales se controla el caudal que se vierte en los surcos. Al respecto, investigadores del Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz (Landeros, 2003), han realizado modificaciones tecnológicas a este diseño durante los últimos años para adaptarlos a los cultivos de caña de azúcar ubicados en los Módulos de Riego I-1 La Antigua y III-1 Puente Nacional del Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz, México.

La utilización de estos sistemas de riego representan una solución viable en términos técnicos y económicos (SEPAGUA, 2013). Con la utilización de éstos, se debe considerar la inclusión de tecnología para fertirrigación que permita la aplicación de agroquímicos y se reduzca considerablemente el impacto ambiental.

Para hacer eficiente el uso de los sistemas de riego tecnificados, se pueden aplicar agroquímicos que mejoren el desarrollo y la producción de los cultivos, lo que se

conoce como fertirrigación. Esta práctica incrementa la eficiencia en la aplicación de los nutrimentos, reduciendo de manera sustantiva su pérdida.

Es por esto que se considera necesario mejorar la aplicación de los fertilizantes en el cultivo de caña de azúcar a través del diseño de un prototipo inyector de fertilizante que, aunado a los sistemas de riego de baja presión por multicompuertas, suministre nutrimentos de manera gradual y homogénea. De esta manera, se logra un uso eficiente del agua y del fertilizante, lo que incrementa los rendimientos por unidad de superficie (Bilbao *et al.*, 2004). Esto, además reducirá los costos de producción, mejorará la conservación ecológica de los recursos, las prácticas agrícolas de los productores y sus beneficios.

Por lo anterior, la primera etapa de este trabajo consistió en identificar los factores hidráulicos en el diseño de un prototipo inyector de fertilizante que se adapte a las condiciones de los sistemas de riego de baja presión por multicompuertas. Posterior a este trabajo, y como parte de otro proyecto de investigación, se cuantificará la eficiencia de aplicación de fertilizante nitrogenado con este inyector, en un sistema de riego de baja presión por multicompuertas, instalado en el Módulo de Riego II-1 Actopan, conocido como Proyecto “El Manzano”.

2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

A continuación se describen los conceptos utilizados en este trabajo para una mejor comprensión y contextualizar así la problemática planteada, y la propuesta de solución al problema de investigación.

2.1 Teoría General de Sistemas (TGS)

Desde hace mucho tiempo, la necesidad de poder comprender fenómenos complejos, sus interrelaciones y su funcionamiento, han generado la necesidad de explicarlos desde sus generalidades hasta sus particularidades. En 1945, Ludwig Von Bertalanffy dio inicio a lo que hoy conocemos como “La Teoría General de Sistemas” (TGS), la cual es una teoría interdisciplinaria e integradora, y trata de sistemas complejos naturales, sociales y de la ciencia; también es un esquema para concebir, investigar o describir un grupo de objetos que actúan de manera conjunta entre sí.

Esta Teoría permite la resolución de fenómenos complejos donde las Leyes de la Física no tienen aplicación, debido a que se pueden aislar objetos de un todo con la finalidad de entender mejor el papel que desempeña cada uno de ellos, como parte de la totalidad del mismo, así como sus interacciones.

Su aplicación abarca desde la rama de la biología, hasta los sistemas dinámicos como son las redes de internet, pasando por la ciencia de la medicina y el estudio de los sistemas donde interactúan muchos individuos, como los ecosistemas y agroecosistemas, por mencionar algunos.

Bertalanffy (1950) consideró a la TGS como un importante dispositivo regulatorio en la ciencia, ya que gracias a esta teoría se pueden transferir principios de una disciplina a otra para la resolución de problemas. Estos aspectos fueron desarrollados con más detalles por Phillips en 1933 descritos por el mismo Bertalanffy (Phillips, 1969).

La TGS está comprendida dentro del campo Lógico – Matemático de los cuales se deducen los principios de cualquier sistema en general. El concepto de la TGS propuesto por Bertalanffy es de gran utilidad para poder entender las interacciones que se dan en un agroecosistema, sobre todo al tratarse de un entorno complejo donde se desarrollan interacciones simultáneas. Además de los procesos bióticos y abióticos se generan procesos del tipo sociocultural y tecnológico, por tal motivo este enfoque ha sido aplicado por varios autores (Hart, 1985 y Conway, 1985, entre otros).

Para poder estudiar un agroecosistema se debe analizar desde un enfoque holístico que permita relacionar las diferentes interacciones que se suscitan en él. Por esto, como lo mencionaron Ruiz-Rosado (2006) y Sevilla (2007), es posible obtener respuestas a dichos problemas si se aplica el enfoque de sistemas aislando sus elementos y estudiando sus dinámicas y relaciones; además de integrar la multidisciplinaria, con la intención de llevar dicho estudio hacia la transdisciplina.

2.1.1 Sistemas

Un sistema se define como un conjunto organizado de elementos que interactúan entre sí en diferente intensidad, así como en su entorno (Bertalanffy, 1950). En la realidad existen sistemas que, por la cantidad de elementos que los integran, pueden considerarse complejos. Por tanto, se debe definir el concepto de sistema complejo, el cual proviene de la palabra complejidad que significa “lo que está tejido junto”. Según la definición de García (2006), esto es: “un Sistema complejo es una representación de un recorte de esa realidad, conceptualizado como una totalidad organizada (de ahí la definición de sistema), en la cual los elementos no son “separables” y, por tanto, no pueden ser estudiados aisladamente”. Una complejidad que está dada por el número de interacciones, la magnitud de estas interacciones y las diversas salidas que puede tener un sistema en donde participan no solo elementos sino también sujetos.

Por lo anterior, se puede representar el concepto de una realidad a través de gráficos con una visión holística de forma organizada, como se hará más adelante.

Dentro de los tipos de sistemas se pueden encontrar: sistemas reales, ideales y modelos que son los que más se asemejan a nuestra realidad y cotidianidad. Otra forma de clasificar a los sistemas es mediante su retroalimentación y por su interacción hacia el exterior se clasifican como sistemas abiertos y cerrados. Cuando éstos no tienen entradas y/o salidas se considera un sistema cerrado. Por otra parte, un ejemplo de un estado característico en un sistema abierto es cualquier lugar donde existen organismos vivos (Bertalanffy, 1950).

Un sistema cuya relación entre sus partes es invariante puede definirse como un sistema estático; por el contrario, cuando sus partes están en constante operación podemos definirlos como sistemas dinámicos. En la actualidad existen sistemas cibernéticos en los cuales hay una interrelación dinámica en todos sus procesos.

Dentro de las propiedades de un sistema se tiene a la Entropía, que es la característica que mide el desorden de un sistema; es la parte no utilizable en el sistema pero que se encuentra presente. Una propiedad más es el nivel de centralización donde todos sus elementos tienen en común la autonomía como individuos que lo hace un nivel organizacional muy complejo. Otra propiedad es que cada individuo se adapta rápidamente a nuevos cambios y esto converge en una estabilidad.

2.2 Agroecología

“La disciplina científica que enfoca el estudio de la agricultura desde una perspectiva ecológica se denomina “agroecología” y se define como un marco teórico, cuyo fin es analizar los procesos agrícolas de manera más amplia”. El enfoque agroecológico considera a los agroecosistemas como las unidades fundamentales de estudio. En estos sistemas los ciclos minerales, las transformaciones de la energía, los procesos biológicos y las relaciones socioeconómicas son investigados y analizados como un todo (Altieri, 2000).

Es por eso que la agroecología es una ciencia que en el transcurso de los años ha sentado las bases para poder llevar a cabo la conversión de sistemas convencionales a sistemas más diversificados y autosuficientes (Altieri y Nicholls, 2007). De esta forma, se pasa de las interacciones eminentemente bióticas a la inclusión del ente social como parte fundamental de manejo de los agroecosistemas y la agroecología.

Este proceso de innovación tecnológica en los campos y el nuevo enfoque de un ecosistema aplicando la TGS, en un contexto de manejo agroecológico, ha dado pie a un nuevo concepto y unidad de estudio de la agroecología como lo es el agroecosistema.

2.2.1 El Agroecosistema

Desde los inicios de la humanidad, el hombre se ha caracterizado por ser errante, que anda en búsqueda de un mejor lugar para vivir y que le brinde el sustento necesario para su existencia. En esta búsqueda, se ha podido establecer en sitios que le brindan los requerimientos apropiados para su vida en sociedad.

La agricultura es una actividad que por muchos años ha sido practicada por la humanidad y tiene como objetivo proveer a los pueblos del alimento para garantizar su subsistencia.

En la época moderna la agricultura ha evolucionado desde su forma puramente técnica a una más compleja, caracterizada por dimensiones sociales, culturales, políticas y económicas (Altieri, 2000).

Pérez-Vázquez en sus notas para el curso de Introducción al estudio de los Agroecosistemas Tropicales (2012) señala que es importante ser específico cuando se utilizan los diversos conceptos de agroecosistema y explicar en qué contexto y bajo qué enfoque se utiliza, debido a que no se ha logrado un entendimiento total en la escala adecuada de su estudio.

El término agroecosistema (AES) es un vocablo que se deriva de los términos: **agro** que significa campo o tierra de labranza; y de **ecosistema** (eco y sistema) comunidad de los seres vivos, cuyos procesos vitales se relacionan entre sí y se desarrollan en función de los factores físicos de un mismo ambiente (Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, 2014). Entonces, etimológicamente hablando, un agroecosistema es un ecosistema campesino (aunque en la realidad no necesariamente es así, también puede ser del tipo comercial) destinado para la producción agrícola donde interactúan muchos organismos vivos, incluido el hombre con sus particularidades.

Uno de los primeros registros de la publicación de esta palabra compuesta se encuentra en la revista *Agro-Ecosystem* (Harper, 1974). Hernández X. (1977) definió el concepto de agroecosistema como “un ecosistema modificado en menor o mayor grado por el hombre para la utilización de los recursos naturales en los procesos de producción agrícola, pecuaria, forestal o de la fauna silvestre”. Márquez (1977) señaló que “Los agroecosistemas son determinados por el medio físico y las condiciones sociales de las poblaciones humanas enclavadas en esa diversidad ecológica y que estos dos factores y la continua interacción recíproca conducen a la complejidad de los mismos”.

Cuanalo De la Cerda y Ponce (1981) mencionaron que el agroecosistema “consiste en la transferencia de energía entre el ambiente y las comunidades de organismos, donde el hombre condiciona el establecimiento y permanencia de las comunidades mediante trabajo”. Odum (1984) definió a los agroecosistemas en términos de cantidad y calidad de energía, como los intermediarios entre los ecosistemas naturales que dependen de la energía solar y los tecno-ecosistemas provistos de combustible por los humanos, tales como las ciudades. Hart (1985) reportó que “un agroecosistema es un conjunto de poblaciones de plantas, animales y micro-organismos que pueden incluir poblaciones de cultivos, animales domésticos o ambos. Es un “subsistema de la finca”, análogo a la unidad de “ecosistema” en Ecología”.

Conway (1985) definió al agroecosistema como un ecosistema modificado por el ser humano para producir alimentos, fibras y otros productos agrícolas. Marten (1988), por otro lado, mencionó que “un agroecosistema es un complejo de aire, agua, suelo, plantas, animales, microorganismos, y todo lo demás en un área limitada que la gente ha modificado para efectos de la producción agrícola. Puede ser de cualquier tamaño”.

Ruíz-Rosado (1995) conceptualizó al agroecosistema como “un ecosistema modificado por el hombre que interactúa con factores socioeconómicos y tecnológicos para la utilización de los recursos naturales, con fines de producción para la obtención de alimento y servicios en beneficio del hombre”. Para justificar el presente trabajo bajo este concepto, se tomó en cuenta la parte tecnológica con la cual se auxilia el hombre en un agroecosistema, según esta definición.

Gliessman (2002) mencionó que un agroecosistema es la manipulación y alteración humana de un ecosistema con propósitos de establecer una producción agrícola. Pérez-Vázquez (2012) comentó que “los agroecosistemas son espacios ambientales de magnitud diversa que históricamente han sido determinados y, en respuesta a ello, modificados en diversa escala por el ser humano para cultivar o manejar especies vegetales y/o animales en diferente arreglo espacial/temporal mediante el uso de energía subsidiaria, con el fin de elevar o mantener niveles de producción que satisfagan las necesidades del productor y/o la sociedad”.

Asimismo, Martínez-Dávila (2011) conceptualizó lo siguiente: “El agroecosistema (AST) es un modelo conceptual de la actividad agrícola en su nivel mínimo de control cibernético humano. El AST es considerado unidad óptima para el estudio de la agricultura y su propia transformación; está eventualmente integrado a un sistema agrícola y rural regional a través de cadenas producción-consumo (o autoconsumo), con interferencias de políticas y cultura de instituciones públicas y privadas. El AST es un sistema contingente, construido a partir de la modificación social de un sistema natural, para contribuir a: 1) La producción de alimentos, materias primas y servicios ambientales que la sociedad demanda; 2) al bienestar de la población rural y 3) a su

propia sostenibilidad ecológica. El AST posee procesos dinámicos de retroalimentación y control, regulados y autorregulados, como respuesta a variaciones internas y de su entorno. La dimensión espacial, biodiversidad y objetivos del agroecosistema dependen del tipo de controlador que lo regula, de los recursos que éste maneja y de su interrelación con el entorno complejo”, donde destaca la importancia del controlador o gobernador en la modificación del entorno.

Debido a cantidad de definiciones que se tienen y por la complejidad que engloban, es difícil definir un concepto exacto de agroecosistema. Por la multitud de interacciones que se desarrollan en su entorno y aunque casi todos coinciden en sus términos, la definición de Martínez-Dávila y la de Ruiz-Rosado antes mencionadas, se adecúan a la propuesta tecnológica que representa el presente trabajo para buscar la sustentabilidad por medio del “Controlador” del agroecosistema en cultivos con caña de azúcar, por lo que en adelante se toman ambos conceptos como base para las menciones del término agroecosistema.

Marten (1988) mencionó que el objetivo de estudiar los agroecosistemas se basa en sus propiedades las cuales son: 1) Productividad, 2) Estabilidad, 3) Sustentabilidad, 4) Equidad y 5) Autonomía.

Para poder abordar el estudio de un agroecosistema se deben conocer los enfoques con los que se estudian. Dependiendo del objeto de estudio, abordar uno de ellos (Moreno, 2010). Por lo antes mencionado, este trabajo también se sustenta en el enfoque de agroecosistema con perspectivas agroecológicas propuesto por Gliessman (2002), apoyándose en la TGS desde el concepto de sistemas complejos de Rolando García descrito anteriormente.

Gracias a esto se pueden tomar los modelos de categorías, procesos y relaciones generales con la producción, propuestos por Parra *et al.* (1984) y el modelo del concepto agrario simplificado de Mazoyer y Roudart (1997), propuesto por Trebil y Kam (2000); para dar lugar al modelo de agroecosistema de Martínez (2010), en el cual

se fusionan los modelos anteriores de manera acoplada para crear un modelo práctico y explícito de los procesos que se correlacionan con el agroecosistema en estudio y el contexto general que lo rodea, según las teorías propias del autor.

En el modelo anteriormente planteado, este trabajo de investigación se ubica dentro del proceso de producción global a nivel de las estructuras agrarias regionales (en el Colpos Campus Veracruz); ya que el desarrollo del mismo se realizó dentro de éste ámbito, como se observa en la Figura 1.

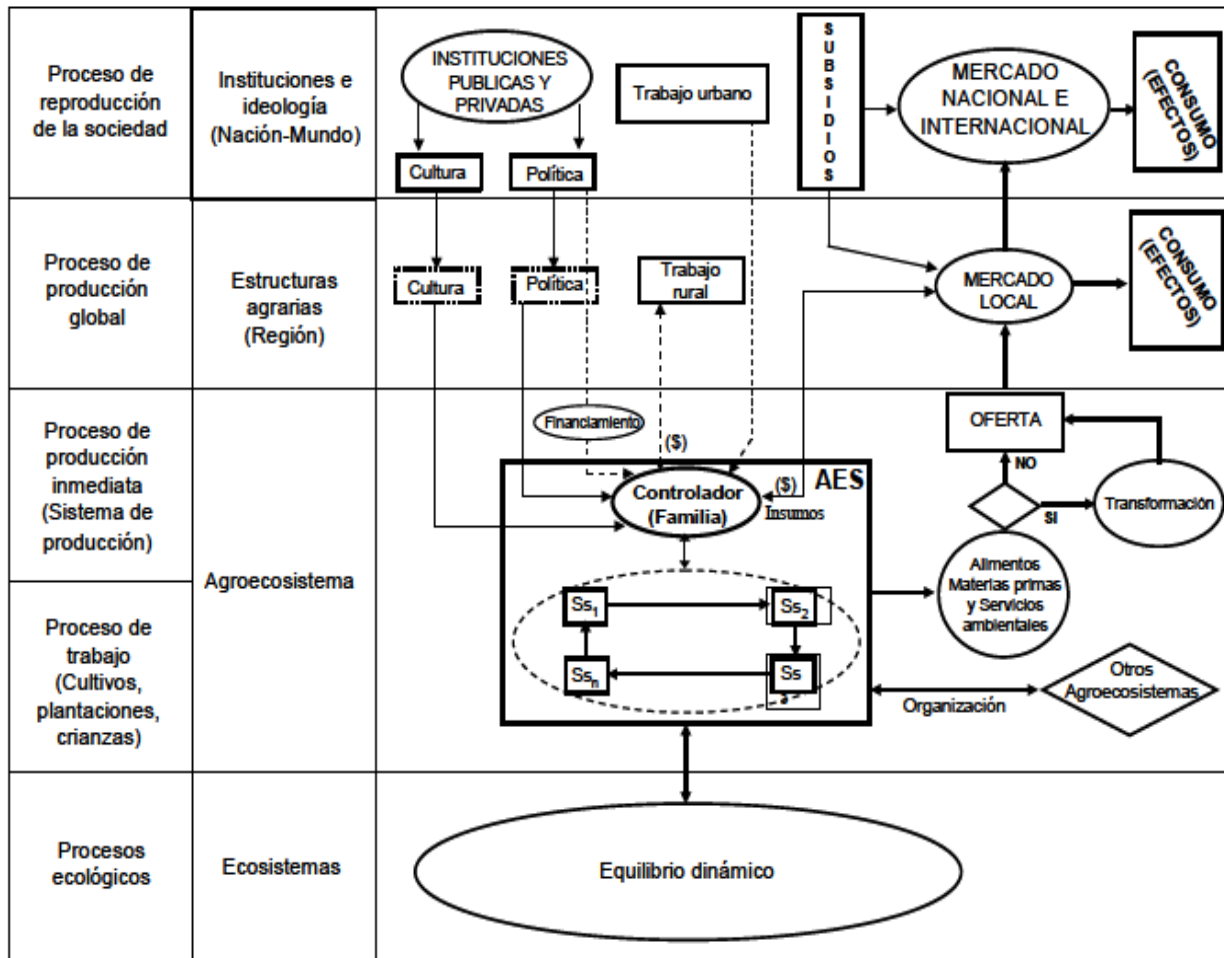


Figura 1. Modelo fusionado de los componentes y procesos del agroecosistema (Fuente: Martínez, 2010).

2.3 Agroecosistemas con caña de azúcar

2.3.1 Historia del cultivo de caña de azúcar

Desde los orígenes de los pueblos, el África Inter-Tropical está relacionada con la historia alimenticia. La caña de azúcar es originaria de Nueva Guinea. En los siglos XIII y XIV, gracias a los árabes y con la islamización se conoció el cultivo de caña de azúcar (Dupin y Brunt, 1973), los cuales la trasladaron a Siria, Palestina, Arabia y Egipto; y posteriormente fue traída a América por los europeos.

En México, la industria de la caña se ha desarrollado ininterrumpidamente desde el inicio de la conquista española, instalándose las primeras industrias azucareras en las partes cálidas del país como parte de la colonización; siendo desde entonces una de

las actividades de mayor tradición y trascendencia en el desarrollo histórico del país y sobre todo, sentó precedentes sobre la región central del Estado de Veracruz donde se continua hoy en día con esta actividad económica importante para nuestro país.

2.3.2 Agroecosistema con caña de azúcar en México: características, superficie y tecnología

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es una gramínea tropical, un pasto gigante emparentado con el sorgo y el maíz en cuyo tallo se forma y acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado en el ingenio forma los granos de azúcar.

Es un cultivo plurianual, que se corta cada 12 meses o antes, y la plantación dura aproximadamente 5 años. Tiene un tallo macizo de 2 a 5 metros de altura con 5 ó 6 cm de diámetro. El sistema radicular lo compone un robusto rizoma subterráneo; puede propagarse por estos rizomas y por trozos de tallo. El jugo de la caña tiene una riqueza de sacarosa del 14 % aproximadamente, aunque varía a lo largo de toda la recolección.

El azúcar es uno de los productos de más consumo a nivel mundial por estar presente en las dietas de todas las culturas y por su alto contenido energético, en algunas partes del mundo es generador directo de empleos. Proviene del cultivo de caña de azúcar la cual después de un proceso industrial se convierte en sacarosa o azúcar común.

Los cultivos de caña de azúcar no soportan temperaturas inferiores a 0 °C. Para crecer exige un mínimo de temperaturas de 14 a 16 °C. La temperatura óptima de crecimiento se sitúa en torno a los 30 °C, con humedad relativa alta y buen aporte de agua. Se adapta a casi todos los tipos de suelos, desarrollándose mejor y obteniéndose una mayor producción en los suelos ligeros, siempre y cuando el agua y el abonado sean los adecuados. En los suelos pesados y de difícil manejo este cultivo constituye muchas veces el único aprovechamiento rentable. Únicamente los suelos ácidos, crean problemas graves para dicho cultivo. Los suelos muy calizos causan, con frecuencia,

problemas de clorosis (CVCA, 2010). México contribuye con un promedio de 5 millones de toneladas anuales al 2011 (S.E., 2012), lo cual equivale al 8.5 % de la producción mundial.

En México la agroindustria azucarera es una actividad importante en términos de desarrollo económico y social en las comunidades rurales, con una superficie aproximada de 673 mil hectáreas. Anualmente se cosecha en promedio 44.1 millones de toneladas de caña y se producen cinco millones de toneladas de azúcar que se obtienen del mismo volumen. En esta actividad participan 55 ingenios ubicados en 227 municipios de 15 estados de la República, generando cerca de dos millones de empleos directos e indirectos, lo que representa una producción del 0.4 % del PIB nacional, 2.5 % del manufacturero y 11.6 % del primario.

El Estado de Veracruz ocupa el primer lugar a nivel nacional en el cultivo de caña de azúcar, aportando el 37 % de la producción total nacional y de la superficie total cosechada. Sin embargo, actualmente la producción de caña enfrenta diversos factores que impactan de manera negativa en la productividad de este cultivo; factores que incluyen aspectos técnicos, económicos y sociales (S.E., 2012). Por lo anterior, esta propuesta significa una posible solución técnica a esta problemática.

En México subsiste una heterogeneidad tecnológica con la que se cultiva la caña de azúcar en los agroecosistemas cañeros según el estado o entidad federativa donde se encuentre. En algunos casos se utiliza de manera intensiva factores de producción alternos para mejoramiento de sus cosechas. En la mayoría de los Ingenios cañeros existe un rezago tecnológico para la producción azucarera (García y Spreen, 2001; Aguilar, 2007; Mejía *et al.*, 2010).

Según SAGARPA (2008), de la superficie cosechada de caña de azúcar en México en el año 2007 con sistema de temporal se establecieron 412 346 ha y con sistemas de riego 278 094 ha, que equivalen al 60 y 40 %, con un rendimiento promedio de 64.01 t·ha⁻¹ el de temporal y 92.4 t·ha⁻¹ el de riego.

Una de las tecnologías disponibles para mitigar este rezago tecnológico es el uso de Agricultura de precisión, donde el Colegio de Postgraduados (COLPOS) ha venido colaborando con SAGARPA para la identificación de necesidades de riego e implementación de dichas tecnologías en los campos mexicanos.

2.3.3 El cultivo de caña de azúcar en Veracruz

Con la llegada de los Españoles a La Antigua, la cual hoy pertenece a una pequeña región del centro del Estado de Veracruz, la posesión de la Corona Española y los Virreyes dieron gran importancia a la introducción del trigo y la caña de azúcar e impulsaron el desarrollo de los ingenios azucareros a lo largo de las costas veracruzanas. Muchas órdenes religiosas fomentaron el cultivo de caña primero como prestamistas y luego como propietarias. Por tal motivo, el cultivo de caña se extendió a costa del cultivo de trigo por lo que posteriormente después este último se limitó, y el Virrey controlaba las licencias para abrir nuevos cultivos de caña (Lira y Muro, 1976).

A través del tiempo, esta tradición de cultivar caña de azúcar se ha mantenido y en la actualidad una gran mayoría de productores del centro del Estado de Veracruz retoman esos orígenes, un tanto por tradición y otros por las facilidades que brindan los Ingenios Azucareros para impulsar este cultivo. Aunque no obtienen ganancias abundantes, la “estabilidad económica y social” que éstos les ofrecen a los productores hace atractiva la propuesta; sin embargo, esta actividad es solamente rentable para productores que poseen grandes extensiones de tierra.

El Estado de Veracruz ocupa el primer lugar en la producción de caña de azúcar a nivel nacional con 18.92 millones de toneladas que equivale al 38 % de la producción nacional (SAGARPA, 2008).

Las zonas cañeras se ubican principalmente en el centro del Estado (Veracruz-Córdoba: nueve ingenios y Veracruz-Papaloapan: once Ingenios) y al Noreste del Estado (Veracruz Noreste: dos Ingenios). En la Figura 2 se observan los 22 ingenios.

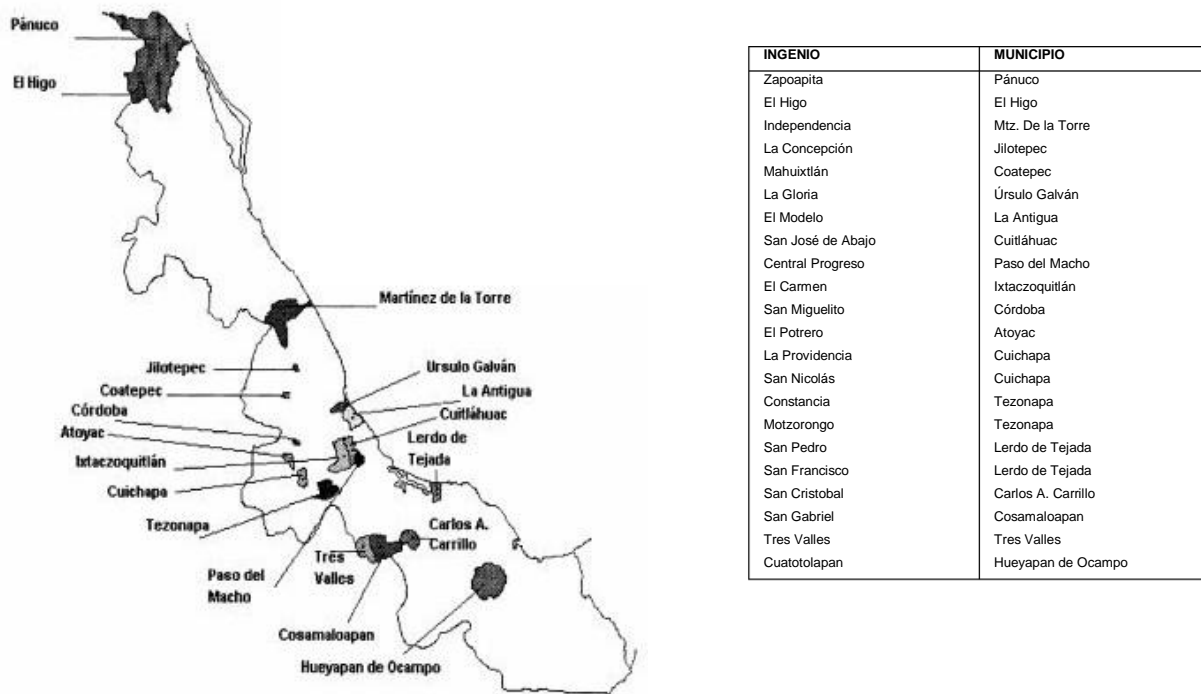


Figura 2. Localización geográfica de ingenios en el Estado de Veracruz (Fuente: Centro de Estudios para la Transición Democrática (CETRADE) A.C., 2013).

2.3.4 Sistemas de riego en el cultivo de caña de azúcar

Los sistemas de riego son importantes para el desarrollo de los cultivos y, en especial, de la caña de azúcar, cuyos requerimientos hídricos son exigentes. Éstos garantizan un desarrollo y una buena producción en las cosechas.

El cultivo de la caña de azúcar, siendo un cultivo de metabolismo C4 (Trujillo, 2011), se desarrolla de manera óptima a altas temperaturas, por lo que éste se cultiva, en general, en las zonas de clima tropical del país. Los diferentes tipos de suelo en los que se produce este cultivo requieren de manera especial un volumen de riego diferente en cada caso. Es necesario, entonces, contemplar los diferentes tipos de riego que se emplean en este cultivo.

- Riego mediante aguas por lluvias de temporal.
- Riego mediante aguas superficiales, subterráneas y residuales en Distritos de Riego (gravedad y presurizado).

- Riego mediante aguas superficiales, subterráneas y residuales en Unidades de Riego (gravedad y presurizado).

Los cultivos de caña de azúcar se manejan con ciertas consideraciones de subsistemas y operación de manera diferente en los Distritos de Riego y en las Unidades de Riego.

Un Distrito de Riego se establece mediante Decreto Presidencial, se conforma por una o varias superficies previamente delimitadas y en cuya área se ubica la zona de riego. Cuenta con obras de infraestructura hidráulica, aguas superficiales y del subsuelo, así como con vasos de almacenamiento, su zona federal de protección y demás bienes y obras conexas. Pueden establecerse también con una o varias Unidades de Riego (Ley de Aguas Nacionales, 2012). En el Cuadro 1 se muestran los Distritos de Riego del Estado de Veracruz.

Cuadro 1. Distritos de Riego del Estado de Veracruz.

CLAVE	NOMBRE	REGION	SUPERFICIE TOTAL (ha)
035	La Antigua	X Golfo Centro	21 851
060	El Higo	IX Golfo Norte	2 250
082	Río Blanco	X Golfo Centro	21 657
092	Río Pánuco,	IX Golfo Norte	44 483

Fuente: CONAGUA, 2012. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola.

Una Unidad de Riego es una unidad de manejo y de cultivo formada por una o varias fincas contiguas. Su superficie permite un diseño racional de la instalación en la parcela atendiendo a criterios agronómicos y económicos razonables.

CONAGUA (2011) reportó que existen 25 Unidades de Riego Superficial en el Estado de Veracruz, distribuidas en un área de 9 819.72 ha y que atienden a 878 usuarios. También hay 313 Unidades de Riego Subterráneo con una superficie de 29 658.83 ha que atienden a 2,873 usuarios. En total las Unidades de Riego en el Estado de Veracruz cubren 39 478.55 ha.

Como ejemplo de los sistemas de riego en los cultivos de caña de azúcar, Domínguez y Aguilar (1999) detallaron un diagnóstico de la Unidad de Riego Puente Nacional del Estado de Veracruz, mismo que servía una superficie de riego de 4000 ha de las 5000 que comprende el proyecto, y proporcionaba agua necesaria para cultivar maíz, frijol, caña de azúcar, jitomate, papayo y pasto. También mencionan que esta Unidad de Riego se empleaba principalmente para agroecosistemas con caña de azúcar, mismos que proveían de materia prima al Ingenio La Gloria.

Un ejemplo de sistemas de riego de baja presión por multicompuertas que se utilizará en esta investigación se localiza en el Módulo de Riego II-1 del Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz. Con el propósito de contribuir a la modernización del riego parcelario se construyó dicho sistema de riego. A través de este sistema de riego se aplica una lámina de riego de 12 cm, con un intervalo de riego de 15 días y un gasto por toma de $35 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Este sistema se diseñó para ser operado con cuatro tomas funcionando simultáneamente (Landeros, 2003).

2.4 Tipos de sistemas de riego

Para incrementar la producción en un cultivo es imperativa la aplicación del agua necesaria a las plantas, mediante un conjunto de estructuras que hacen posible que un área determinada pueda ser cultivada. A este conjunto de estructuras se le denomina Sistema de Riego.

Los sistemas de riego constan de diferentes componentes que deben operarse de acuerdo a las especificaciones que se reciban del proveedor correspondiente, a fin de optimizar el uso del agua en tiempo y espacio.

Gurovich (1999) definió al riego de la siguiente manera: “El riego es la aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil de suelo para reponer en éste, el agua consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos”.

México cuenta con 5.5 millones de hectáreas que se encuentran bajo riego (Landeros *et al.*, 2014) clasificándose en el sexto lugar a nivel mundial en la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID por sus siglas en inglés) (IMTA, 2013). Dicha superficie se encuentra distribuida en 112 Distritos de Riego, y 21 296 Unidades de Riego para el desarrollo rural (CONAGUA, 2012).

En esta superficie se utilizan diversos sistemas de riego, de los cuales destaca el riego por gravedad, mismo que se utiliza en más del 90 % de la superficie. El restante lo ocupan sistemas de riego presurizado.

En los sistemas de riego tecnificado predomina el de tubería con compuertas (aproximadamente el 50 %), le siguen el riego por aspersión y, en menor proporción el de micro-aspersión y el riego por goteo.

Dentro de los tipos de sistemas de riego existen diferentes métodos para la aplicación del agua en los lugares donde la escasez de ésta evita el crecimiento normal del cultivo. La diferencia entre estos métodos, estiva principalmente en el nivel de presión requerida para la operación del emisor o hidrante. El Cuadro 2 muestra los diferentes sistemas de riego donde se pueden apreciar dichas diferencias.

Cuadro 2. Clasificación de los sistemas de riego con base en el nivel de presión requerida en el emisor o hidrante (ECOLÓGICA, 2009).

	PRESIÓN	COBERTURA	CLASIFICACIÓN	TIPO	
Sistema de Riego	Presión Nula	Cobertura total del terreno	Sub superficial	Nivel freático controlado	
	Baja Presión		Superficial	Melgas	
			Multicompuertas (0.1-0.2 Kg/cm²)	Surcos Surcos en contorno Corrugaciones y cajetes	
	Alta Presión		Cobertura parcial del terreno	Aspersión (2-7 Kg/cm ²)	Estacionarios
		Semifijo			
		Portátil			
		Cañón Fijo			
		Side Roll			
		Movimiento Continuo			Pivote Central
	Goteo (0.5 -1.3 Kg/cm ²)	Superficial			
Enterrado					
Micro aspersión (1.3-2.5 Kg/cm ²)		Microaspersión			
		Borboteo			

2.4.1 Los sistemas de riego de baja presión

En la actualidad algunos sistemas de riego requieren de energía eléctrica para mover el agua desde su fuente hacia el cultivo. En terrenos donde es desfavorable el desnivel se tiene que bombear el agua para presurizar la línea (alta presión), lo cual conlleva a utilizar energía adicional y un gasto extra para el productor. Cuando se dispone de una altura topográfica o desnivel entre la fuente de agua y la parcela, se obtiene cierta presión debido a la fuerza de gravedad que puede ser utilizada para su distribución sin requerir energía extra.

Gracias a esta diferencia de alturas se genera una presión en el interior de las tuberías (presión de timbraje), misma que se aprovecha para asegurar la conducción del agua a

los cultivos. Los sistemas de riego de baja presión requieren en el hidrante de una presión del orden de 0.1 a 0.2 kg/cm², es decir de 1 a 2 mca. Puede ser un poco mayor, dependiendo de las condiciones de la parcela (desnivel, tamaño, etc.). A este tipo de sistema de riego también se le conoce como riego por gravedad.

2.4.2 El sistema de riego de baja presión por multicompuertas

Un sistema de riego de baja presión por multicompuertas es un sistema de conducción y distribución de agua de riego por medio de tuberías de PVC, las cuales trabajan a baja presión. El caudal de agua se dirige a los surcos abriendo o cerrando compuertas destinadas para este fin en el trayecto de la tubería principal. Con este sistema se alcanzan altas eficiencias de aplicación que van desde el 70 % al 90 % (Cedillo y Calzada, 2010).

En general, esta técnica de riego consta de las siguientes partes: la fuente de abastecimiento, la red de conducción hidráulica, las tomas hidrantes y la tubería multicompuertas de aplicación de riego. Estas tuberías multicompuertas constan de pequeños orificios regulables (compuertas) que se hacen coincidir con los surcos de la parcela. Así, el riego es uniforme, debido a que entra la misma cantidad de agua en cada surco; de no ser así, se abren o se cierran las compuertas de cada surco dependiendo el caso.

Con esta mejora al riego tradicional por gravedad se evita la erosión hídrica, las pérdidas por evaporación, la irregularidad del riego y se hace un uso eficiente del agua.

No se recomiendan estos métodos de riego si la tasa de infiltración es de más de 10 cm·hr⁻¹ (Cedillo y Calzada, 2010). Por otra parte, la pendiente del terreno a regar debe ser muy pequeña, máximo del 3 %, con una pendiente óptima del 0.2 % (Palacios, 1998).

Las ventajas más importantes del riego por gravedad por multicompuertas, son los bajos costos en relación a los de aspersión y goteo. Son fáciles de manejar, el viento no le afecta y se requiere solo de la energía hidráulica para su distribución (Cedillo y Calzada, 2010).

Los sistemas de riego por multicompuertas cada vez son más frecuentes a nivel mundial. Por ello, y por su esencia, que es la conducción de agua mediante tuberías, los hacen un método factible para realizar fertirrigación.

2.5 Fertirrigación

El desarrollo de un cultivo está directamente ligado a las condiciones óptimas para su crecimiento. Los componentes bióticos y abióticos que son indispensables para el crecimiento de la planta pueden complementarse utilizando nutrientes extras que le proporciona un fertilizante químico (Orozco, 1998).

Una técnica que permite la inyección de fertilizantes utilizando el caudal del agua con que se riega como vehículo del mismo, es la fertirrigación. Es una técnica moderna desarrollada en la década de los años 60's principalmente por los israelitas, también llamada fertigación, y es el proceso mediante el cual, los fertilizantes o elementos nutritivos que necesita una planta son aplicados y disueltos en el agua de riego (Martínez, 2005).

Domínguez (1993), definió la fertirrigación como “la aplicación de los fertilizantes y más concretamente, la de los elementos nutritivos que precisan los cultivos, junto con el agua de riego”.

2.5.1 Fertirrigación: Ventajas y Desventajas

Cadahía (2005) citó las ventajas y desventajas de un sistema de fertirrigación:

“Ventajas:

- Dosificación racional de los fertilizantes.
- Ahorro considerable de agua.
- Utilización de aguas de riego de baja calidad.
- Nutrición optimizada del cultivo y por lo tanto aumento de rendimientos y calidad de los frutos.
- Control de la contaminación.
- Mayor eficiencia y rentabilidad de los fertilizantes.
- Alternativas en la utilización de los diversos tipos de fertilizantes: simples, complejos cristalinos y disoluciones concentradas.
- Fabricación “a la carta” de fertilizantes concentrados adaptados a un cultivo, suelo o sustrato, agua de riego y condiciones climáticas durante todos y cada uno de los días del ciclo de cultivo.
- Automatización de la fertilización.

Las posibles desventajas del sistema son:

- Coste inicial de infraestructura.
- Obturación de goteros (en caso de sistemas de riego por goteo).
- Manejo por personal especializado.”

2.6 Concepto de fluido, presión y caudal

Varios elementos entran en juego en los sistemas de fertirrigación, como son: el tipo de fluido, la presión en el sistema de riego y el caudal de fluido que pasa por los inyectores de fertilizantes. Los cuales se describen en subsecuente.

Concepto de fluido: Según Herráez y Delegido (2010), lo conceptualizaron como: “los fluidos son la forma de agregación de la materia caracterizada por no tener forma propia”. Un fluido se caracteriza porque sus moléculas pueden deslizarse entre sí, venciendo una pequeña fuerza de rozamiento (viscosidad) entre moléculas o capas adyacentes (se considera nula para fluidos ideales). Pueden ser líquidos o gases. Estos últimos se caracterizan por no tener volumen propio y ser altamente compresibles, por

lo que la densidad ρ no es constante. La fórmula para ambos se muestra a continuación:

$$\text{Líquidos: } \rho = \frac{m}{V} = cte \quad (1)$$

Dónde: ρ : densidad (kg/m^3); m : masa (kg) y V : volumen (m^3)

$$\text{Gases: } \rho = \frac{m}{V} \neq cte \quad (2)$$

Concepto de Presión: Los mismos Herráez y Delegido (2010) definieron presión como la fuerza por unidad de superficie:

$$P = \frac{F}{S} \quad (3)$$

Dónde: P : Presión (kg/cm^2); F : Fuerza (kg) y S : Superficie (cm^2).

La presión hidrostática (P_s) es la presión que surge en un líquido por efecto de la masa líquida: densidad (ρ), aceleración de la gravedad (g) y su altura (h):

$$P_s = h \cdot \rho \cdot g \quad (4)$$

Dónde:

h : altura (m); ρ : densidad (kg/m^3) y g : aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).

Concepto de Caudal: es el volumen de líquido (V) que fluye a través de una sección en una unidad de tiempo definida (t). En hidráulica se emplea el símbolo Q para denominar el caudal.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (5)$$

Dónde:

Q : Caudal (m^3/s); V : Volumen de agua (m^3); y t : tiempo (s)

2.7 Ecuación de continuidad

En mecánica de los fluidos, la Ley de la Conservación de la Masa se expresa mediante la ecuación de la continuidad, la cual constituye uno de los recursos básicos para el planteamiento y la resolución de problemas relacionados con esta ciencia.

Es una secuencia del principio de conservación de la masa para el flujo permanente. Expresa, que la masa del flujo que atraviesa cualquier sección de una corriente de fluido por unidad de tiempo, es constante. La ecuación de la continuidad se expresa como sigue:

$$Q = A_1 V_1 - A_2 V_2 = \text{constante} \quad (6)$$

Dónde:

Q: caudal (m^3/s); A: área de la sección transversal (m^2) y V: velocidad del fluido (m/s).

2.8 Número de Reynolds

Una de las variables que se deben tener en cuenta en el flujo de tuberías de los sistemas de riego, es el de tipo de flujo existente dentro de las mismas. Existen básicamente dos tipos de flujo con respecto al espacio, que se deben tomar en cuenta: flujo uniforme y flujo no uniforme (si las cantidades físicas permanecen o no constantes en el espacio). Si se habla de flujos con respecto al tiempo se tiene: permanentes y no permanentes (si las cantidades de flujo permanecen constantes o no en el tiempo); ambos se presentan en los sistemas de riego de tuberías a baja presión, dependiendo de la carga de presión existente. Si se emplea una válvula reguladora de flujo, se puede obtener un flujo permanente.

Debido a la resistencia que presentan los materiales de los conductos por los cuales se transporta el fluido, existen tres tipos de flujo: flujo laminar, de transición y turbulento, descritos en los experimentos de Osborne Reynolds (1842-1912), en el año de 1883.

El flujo laminar se presenta cuando el flujo se mueve en capas sin intercambio de “paquetes” de fluido entre ellas, corresponde a un caudal bajo.

Si existe un aumento en la velocidad del fluido (caudal alto), se presenta un intercambio de “paquetes” de entre las capas que se mueven a diferente velocidad. Al suceder esto, estamos hablando de un flujo turbulento, donde las partículas no tienen un vector velocidad definido; el flujo nunca es estacionario.

Cuando el flujo laminar empieza a volverse inestable se transforma en flujo de transición, con una ondulosidad manifiesta y tiende a volverse turbulento. Para definir el tipo de flujo que se presenta en una tubería se emplea la fórmula que corresponde al número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{Vdp}{\mu} \quad (7)$$

Dónde:

Re: Numero de Reynolds (adimensional); V: velocidad del fluido (m/s); d: diámetro de la tubería (m); ρ =densidad del fluido (kg/m^3); μ = coeficiente de viscosidad dinámica ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$).

Si el flujo no rebasa los 2200 Re, se considera laminar. Si está entre 2200 y 4500 Re, se considera de transición, y si excede los 4500 Re, entonces el flujo es turbulento.

2.9 Teorema de Bernoulli

Otro aspecto importante a considerar como marco teórico en este trabajo es la ecuación de Bernoulli, desarrollada por Daniel Bernoulli (1700-1782). Es la relación entre la presión, la velocidad y la elevación; válida en regiones de flujo estacionario e incompresible en donde las fuerzas netas de la fricción pueden ser o no despreciables.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{Constante} \quad (8)$$

Dónde:

P: Presión (kg/cm^2) ρ : Densidad (kg/m^3); V: Velocidad del fluido (m/s);
g: Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2) y z: diferencia de alturas o elevación (m).

2.10 Tubo Venturi

El Tubo Venturi lo creó el físico e inventor italiano Giovanni Battista Venturi (1746–1822). Según este autor, el tubo es un dispositivo para medir el gasto del fluido, es decir, la cantidad de flujo por unidad de tiempo a partir de un diferencial de presión que

existe, entre el lugar por donde entra la corriente del fluido, y el punto calibrable de mínima sección del tubo, en donde su parte ancha final actúa como difusor.

El Tubo Venturi es un dispositivo que origina una pérdida de presión en un fluido al pasar por medio de él. En esencia, consta de una tubería corta recta o garganta, entre dos tramos cónicos. La presión varía en la proximidad de la sección estrecha; así, al colocar un manómetro o instrumento registrador en la garganta, se mide la diferencia de presión y hace posible calcular el caudal instantáneo.

Este principio se utilizó para el diseño y construcción de los prototipos inyectores de fertilizante.

2.11 Inyector tipo Venturi

En la técnica de fertirrigación es necesario un dispositivo que inyecte el fertilizante al sistema de riego de manera constante. Los métodos más comunes para este propósito, incluyen una bomba inyectora o un dispositivo inyector tipo Venturi.

Mataix (2005) definió al inyector tipo Venturi como “un dispositivo con una sección convergente, seguida de una garganta y de una sección divergente, que gradualmente vuelve al diámetro inicial”.

2.12 Definición de coeficiente de descarga

Coeficiente de descarga (C_d) es la relación entre la cantidad de fluido que pasa por la entrada del inyector (producto del vacío generado por la diferencia de presiones), con respecto a la salida del mismo por su extremo opuesto.

$$C_d = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{2gho}} \sqrt{1 - \beta^4} \quad (9)$$

Dónde:

d : diámetro del puerto de inyección (m); g : Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)

h_0 : diferencial de altura (m); β : Relación de diámetros (d/D) (*adimensional*);
y Q : Caudal ($L s^{-1}$).

2.13 Definición de rendimiento del inyector Venturi

Rendimiento es la relación que existe, entre la salida del inyector y su puerto de succión de fertilizante con respecto a la entrada del inyector. Para el cálculo del rendimiento se utilizó la relación recomendada por Zárate (1995), en la evaluación del dispositivo:

$$n \% = \frac{Q_2 p_3 - Q_2 p_2}{Q_1 p_1 - Q_1 p_3} \times 100 \% \quad (11)$$

Dónde:

n : Rendimiento del inyector(%);

Q_1 : Caudal en la entrada del inyector; Q_2 : Caudal en el puerto de succión($L s^{-1}$)

p_1 : Presión Hidráulica en la entrada del inyector (kg/m^2);

p_2 : Presión Hidráulica en puerto de inyección (kg/m^2);

p_3 : Presión Hidráulica a la salida del inyector(kg/m^2).

Con esto se obtuvieron las bases para realizar los cálculos en el desarrollo de los prototipos inyectores de fertilizantes, en los agroecosistemas con caña de azúcar.

2.14 Definición de eficiencia de aplicación de fertilizantes

Según el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española (2013), *eficiencia* es “la capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un objetivo determinado con el mínimo de recursos posibles viable”. La eficiencia de aplicación de fertilizante en un agroecosistema con caña de azúcar se entiende entonces como, la capacidad de fertilizar un cultivo de caña de azúcar, utilizando el mínimo de fertilizante requerido, mano de obra y energía posible, con un uso razonable del agua.

Palma-López *et al.* (2000) dicen que “La eficiencia es la cantidad de nutrimento del fertilizante aplicado al suelo que es aprovechado por la planta y depende de factores

como el tipo de cultivo, clase de suelo, la fuente de fertilizante, la época y forma de aplicación”.

2.15 Simulación

En la actualidad las ventajas que ofrece el desarrollo tecnológico en el campo de los sistemas de cómputo de realizar procesos que hace una década no estaban al alcance de los usuarios comunes, hoy se pueden aprovechar mediante algunos programas de cómputo para la realización de simulaciones con modelos extraídos de la realidad.

Un concepto que se debe tomar en cuenta bajo el enfoque de la TGS es el de simulación. Shannon (1988) lo detalló como “el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso real y llevar a cabo experimentos con este modelo, con el fin de entender el comportamiento del sistema y / o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema”; del cual, menciona posteriormente, tiene la característica de permitirnos evaluar un proceso real (exista o no) para conocer parte de su comportamiento, y posteriormente experimentar directamente en él.

Esta definición da lugar a la metodología con que se abordó la presente investigación. Dicha metodología se menciona con más detalle posteriormente; y que de acuerdo con Guasch (2002), es posible generar salidas para la creación de modelos estadísticos, que permitan evaluar el proceso simulado a través de los resultados obtenidos en tal simulación.

3. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Un agroecosistema con caña de azúcar contiene un sinnúmero de interacciones, y por ende, problemas varios del tipo ambiental, socio-económico, político, y tecnológico; por lo que, para comprenderlo se debe analizar desde un enfoque de la TGS. Por tal motivo, como lo mencionó Ruiz-Rosado (2006), se pueden obtener una respuesta a dichos problemas si se aplica este enfoque. Se deben aislar sus elementos, y estudiar sus dinámicas y relaciones para integrar un trabajo multidisciplinario, con la intención de trasladar los resultados de dicho estudio hasta la transdisciplina. La Figura 3 muestra algunas de las interacciones en un agroecosistema con caña de azúcar de la región centro del Estado de Veracruz, donde se denota una baja eficiencia en la aplicación de fertilizantes.

Por otra parte, México cuenta con alrededor de 112.337 millones de habitantes y una superficie de casi 2 millones de km² (INEGI, 2010), una precipitación media anual de 777 mm en el periodo de 1941-2002, que equivalen a 1,511 km³ de agua. Junto con los 48.9 km³ que se reciben de Estados Unidos y Guatemala, totalizan 1,559 km³. La mayor parte regresa a la atmósfera por evapotranspiración (69 %) y 0.43 km³ son entregados a Estados Unidos conforme al Tratado de Aguas de 1944. La disponibilidad natural media total es de 476 km³ (SEMARNAT, 2009), lo cual equivale a una disponibilidad de agua *per cápita* de 4,760 m³ por año. Esta cantidad es suficiente de acuerdo a los estándares internacionales, pero su desigual distribución en espacio y tiempo, así como la escasez de agua con la calidad requerida para los diferentes usos, derivan en frecuentes problemáticas entre usuarios, regiones y sectores.

Los deslaves por lluvias o la inundación de tierras fertilizadas en laderas cercanas a ríos y mares, traen consigo una erosión excesiva de los suelos, y la contaminación de las aguas superficiales (Landeros *et al.*, 2014).

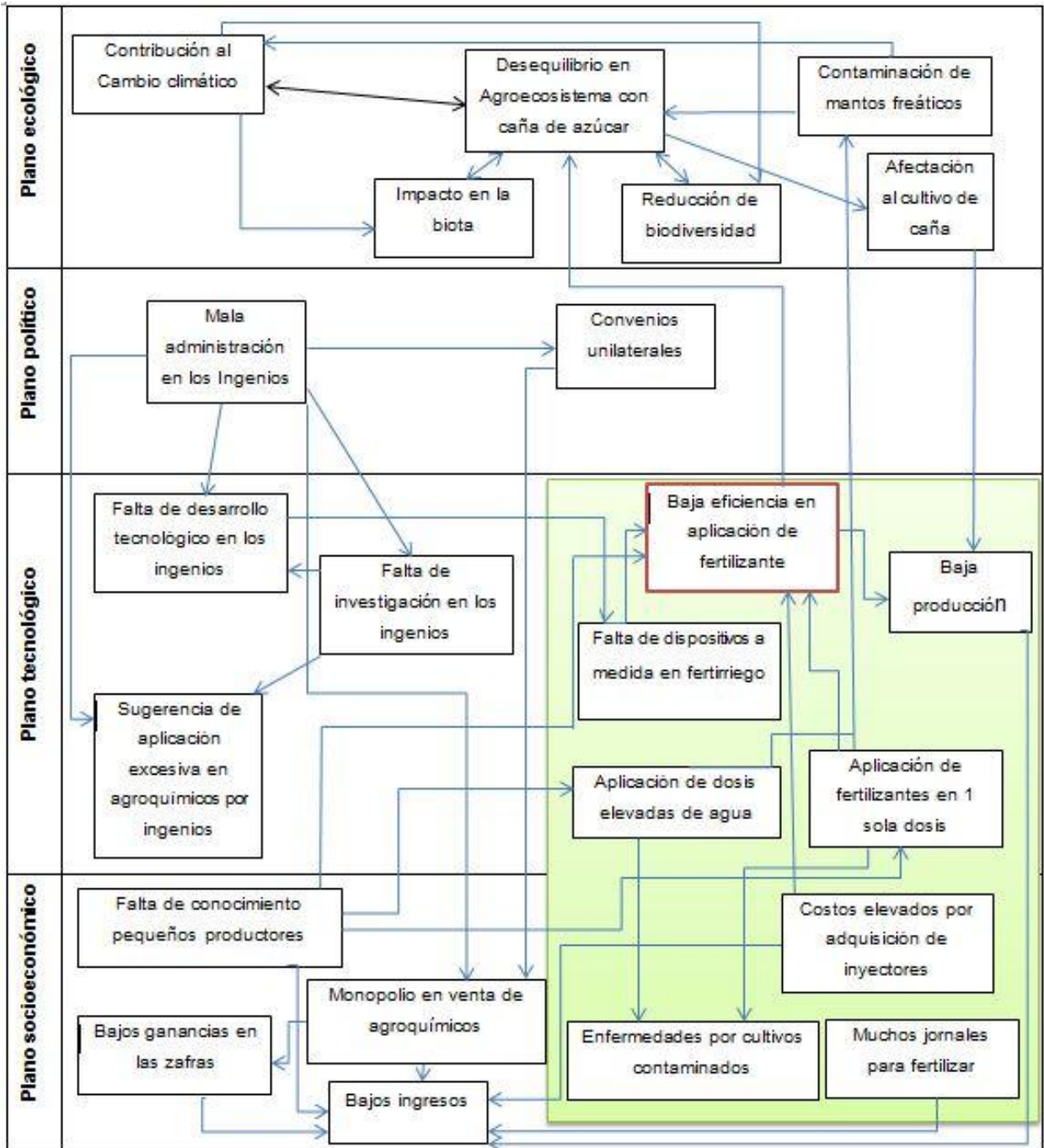


Figura. 3. Situación problemática de un agroecosistema con caña de azúcar en la región centro del Estado de Veracruz.

La FAO (2007) señaló que la pérdida de recursos naturales afecta a los medios de subsistencia de la población al cambiar las condiciones en las que ésta basa sus estrategias de supervivencia, haciéndola más vulnerable a los trastornos. Por lo que el

“controlador” del agroecosistema debe procurar el aprovechamiento sustentable del agua. En algunos AES con caña de azúcar, las malas técnicas de riego generan que se aneguen los cultivos después de fertilizar y el agua se desaproveche.

La aplicación de dosis elevadas de fertilizantes, y posteriormente grandes volúmenes de agua de riego en suelos permeables, puede ocasionar que se filtren altas cantidades de nitratos en aguas subterráneas (Civeira *et al.*, 2003).

Por otra parte, el uso descontrolado de pesticidas y fertilizantes que contienen nitrógeno, propicia que los excesos se lixivien a los mantos freáticos, contaminándolos y dando lugar a posibles enfermedades en los consumidores de los derivados de la caña de azúcar (Galaviz, 2010).

Cuando se aplican fertilizantes en los AES con caña de azúcar mediante el método tradicional de aspersión manual, por lo general se realiza en una sola dosis. Esto provoca que la cantidad de nitrógeno requerida por el cultivo sea superada, quedando un excedente desaprovechado en la superficie.

Asimismo, los productores invierten mucho dinero en abonos para sus cultivos. Para aplicar estos nutrientes tienen que pagar jornales que le permitan llevar a cabo esta tarea. Por su desconocimiento en cuanto a la cantidad de fertilizante requerido por el cultivo, y para aprovechar los jornales contratados, la aplicación se lleva a cabo en una sola dosis. Si la misma se fragmenta, tendrían que pagar 2 o 3 veces más.

Por otra parte, los sistemas de riego por multicompuertas se rediseñaron para implementarse en los cultivos de caña de azúcar en la zona centro del Estado de Veracruz, por investigadores del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, con la finalidad de optimizar el uso del agua. Su eficiencia está en el rango del 70 al 85 %; pero en la actualidad estos sistemas no cuentan con un dispositivo a medida para la aplicación de agroquímicos mediante fertirrigación. Al tener un diseño de riego por multicompuertas para el módulo de Riego II-1 Actopan de la zona Centro del Estado de

Veracruz, se debe considerar también un dispositivo inyector de fertilizante que se adapte a estas condiciones.

Un problema que se tiene si se quiere realizar fertirriego utilizando estos sistemas de riego, es que los inyectores tipo Venturi comerciales de estas dimensiones son muy escasos o de costos muy elevados. Su integración supone entonces, un esfuerzo económico considerable para el productor en su implementación.

Por tanto, el uso consiente del agua en un agroecosistema con caña de azúcar está directamente relacionado con la eficiencia del sistema de riego y de la eficiencia en la aplicación de agroquímicos. Al existir deficiencias en los campos veracruzanos de la zona centro en estos aspectos, se requiere una solución a este problema.

Con la implementación de un dispositivo que reduzca los daños colaterales por las malas prácticas agrícolas en la aplicación de productos agroquímicos, el productor cañero se beneficiará con un aumento en su producción y ahorro económico. También favorecerá la conservación de los ecosistemas haciéndolo sus agroecosistemas sustentables, al mismo tiempo que contribuye con la mitigación del cambio climático.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Existe la necesidad de asegurar la adecuada aplicación de los fertilizantes mediante dispositivos inyectoros de fertilizantes en los sistemas de riego de baja presión por multicompuertas de los agroecosistemas con caña de azúcar. El campo de acción se ubica en el Módulo de Riego II-1 Actopan. Se debe garantizar la eficiencia en el funcionamiento de los inyectoros para que incrementen la producción, se conserven los recursos naturales, disminuyan los impactos ambientales y los costos de operación, reflejándose en el incremento del nivel socioeconómico del productor y en su calidad de vida.

4.1 Problema de investigación

Ya que el problema de investigación recae en la eficiencia de aplicación de fertilizantes por parte de los productores, se debe buscar un mecanismo que contribuya a la solución del mismo. De ahí que surge la pregunta a abordar y resolver en este trabajo:

¿Cuáles son los factores hidráulicos que hacen eficiente a un inyector de fertilizante tipo Venturi empleado en un sistema de riego de baja presión por multicompuertas sin uso de energía externa en un agroecosistema con caña de azúcar?

5. HIPÓTESIS

5.1 General

Los factores hidráulicos que hacen eficiente a un prototipo inyector de fertilizante tipo Venturi, empleado en un sistema de riego de baja presión por multicompuertas sin energía externa en un agroecosistema con caña de azúcar son: el ángulo convergente, ángulo divergente, los diámetros de garganta y la carga de presión hidráulica en el sistema de riego.

5.2 Particulares

H₁. La carga de presión y el gasto del sistema de riego definen los ángulos convergente, divergente y el diámetro de garganta a utilizar en un inyector de fertilizante para un óptimo funcionamiento.

H₂. El correcto diseño y modelado de un dispositivo inyector de fertilizantes para sistemas de riego de baja presión por multicompuertas garantiza una velocidad de fluido constante.

H₃. La identificación de las características hidráulicas de los modelos mediante el método de simulación por software computacional garantiza la correcta selección del prototipo a construir.

6. OBJETIVOS

6.1 General

Identificar el ángulo convergente, ángulo divergente, los diámetros de garganta y la carga de presión hidráulica que hacen eficiente a un inyector de fertilizante tipo Venturi, a emplearse en un sistema de riego de baja presión por multicompuertas sin energía externa dentro de un agroecosistema con caña de azúcar.

6.2 Particulares

OP₁. Identificar las cargas de presión y el gasto en el sistema de riego para definir los ángulos convergente, divergente y el diámetro de garganta para el funcionamiento óptimo del inyector de fertilizante.

OP₂. Diseñar y modelar dispositivos inyectores de fertilizante para sistemas de riego de baja presión por multicompuertas que garantice un alto coeficiente de descarga de fertilizantes.

OP₃. Simular e identificar los modelos de prototipos que proporcionen el mejor desempeño variando sus características hidráulicas como lo son el ángulo convergente, ángulo divergente, diámetro de entrada del inyector, diámetro de salida del inyector, diámetro de garganta y diámetro de la entrada de succión, para su construcción.

7. MARCO DE REFERENCIA

En nuestro país, el 13 % de la población nacional se dedica a cultivar caña de azúcar (Secretaría de Economía, 2012) y Veracruz ocupa el 1er. lugar a nivel nacional, con 37 % de la producción total nacional, de la superficie total cosechada con 2 010 889 t (PRONAC, 2009), a pesar de los bajos rendimientos debido a la deficiente aplicación de los productos agroquímicos. Para la realización de este trabajo de investigación se tomaron en cuenta las características de sistemas de riego de baja presión por multicompuertas ubicados en el Módulo de Riego II-1 Actopan. Distrito de Riego 035 (Landeros, 2003).

7.1 Módulo de Riego II-1 Actopan. Distrito de Riego 035

7.1.1 Localización

El Distrito de Riego 035 La Antigua se encuentra en el sureste del país, en el Estado de Veracruz. Se ubica entre los paralelos 19°09' y 19°33' de la Latitud Norte y los meridianos 96°17' y 96°33' de Longitud Oeste de Greenwich.

La altitud sobre el nivel del mar varía de los 5 hasta los 140 msnm, localizándose las alturas máximas al oeste y las mínimas al este del Distrito de Riego. Las características generales del área, donde se ubica el Módulo de Riego II Actopan, Distrito de Riego 035 se mencionan a continuación.

7.1.2 Hidrología

El Distrito de Riego se abastece de los ríos La Antigua y Actopan con sus respectivos afluentes. La cuenca del río La Antigua cubre una superficie de 2,827 Km² y su escurrimiento medio anual es de 2 050 614.2 x 10³ m³, presentándose las mayores aportaciones en el mes de septiembre con un escurrimiento de 451 975 300 m³ y la mínima en el mes de abril con un escurrimiento de 51 687 600 m³.

El río Actopan tiene una cuenca que cubre una superficie de 2001 km² y su escurrimiento medio anual es de 533 144 000 m³. En el mes de septiembre se presentan las mayores aportaciones (\pm 63 084 000 m³) y las aportaciones mínimas en el mes de mayo (\pm 29 800 000 m³) (Landeros, 2003).

7.1.3 Clima

Según la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García *et al.* (1989), el clima de la zona donde se localizan los Módulos I-1 y III-1 corresponde a un A w1(w) (i)w" cálido húmedo con vegetación de bosques, poca oscilación térmica, no es tipo Ganges, con canícula y lluvias en verano. Se registran lluvias abundantes en verano y principios de otoño. Humedad deficiente en invierno y primavera. Presenta un periodo prolongado de sequía, con temperaturas en verano que oscilan entre 25 y 35°C.

7.1.4 Suelos

El área de estudio donde se encuentra el Proyecto "El Manzano" tiene suelos formados por rocas ígneas y sedimentarias que al estar a la intemperie y erosionadas fueron acarreadas y depositadas por las corrientes en las márgenes y deltas de los ríos y arroyos. Este proceso de formación dio lugar a geo formas de planicies de color café en varios tonos con contenido variable de arcilla y arena. En parte de esta área, los suelos resultaron de la deposición de aluviones con alto contenido de fragmentos rocosos de ruiditas redondeadas, dando lugar a suelos negros, someros, muy arcillosos y con alto contenido de piedras y gravas. Además, existen áreas colindantes a las planicies que tienen suelos negros, los cuales son moderadamente profundos, muy arcillosos, sin piedras y asentados en material tepetatoso. Existen lomeríos de suelos de color café rojizo de texturas finas y espesor moderadamente profundo. El 60 % del total de los suelos tiene categoría de 1^a; el 30 % son suelos de 2^a categoría afectados principalmente por pedregosidad; y el 10 % restante son suelos de 3^a categoría con problemas de pendientes pronunciadas, que incluso podrían caer hasta en la 4^a categoría (Landeros, 2003).

La topografía existente tiene en la mayoría de los casos una pendiente promedio de 0.12 % en el sentido del riego.

7.2 Proyecto El Manzano

El presente trabajo de investigación se implementará en un AES con caña de azúcar, dando continuidad al proyecto de diseño de tuberías de baja presión por multicompuertas del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz que opera en la actualidad de nombre “El Manzano”.

El proyecto El Manzano se desarrolló en el módulo de riego II-1 Actopan. Este proyecto se llevó a cabo en el año 2003 en los ejidos Arroyo de Piedra, Ver., Zapotito, Ver., e Ídolos, Ver. (Landeros, 2003).

7.3 Ejido Arroyo de Piedra, Actopan, Ver.

7.3.1 Localización

La comunidad de Arroyo de Piedra se encuentra localizado en el municipio de Actopan, Veracruz. Sus coordenadas geográficas son Longitud: 19° 27' 00', Latitud:-96° 28' 43". La localidad se encuentra a una altura de 60 msnm. La Figura 4 muestra la ubicación del ejido Arroyo de Piedra, Ver.

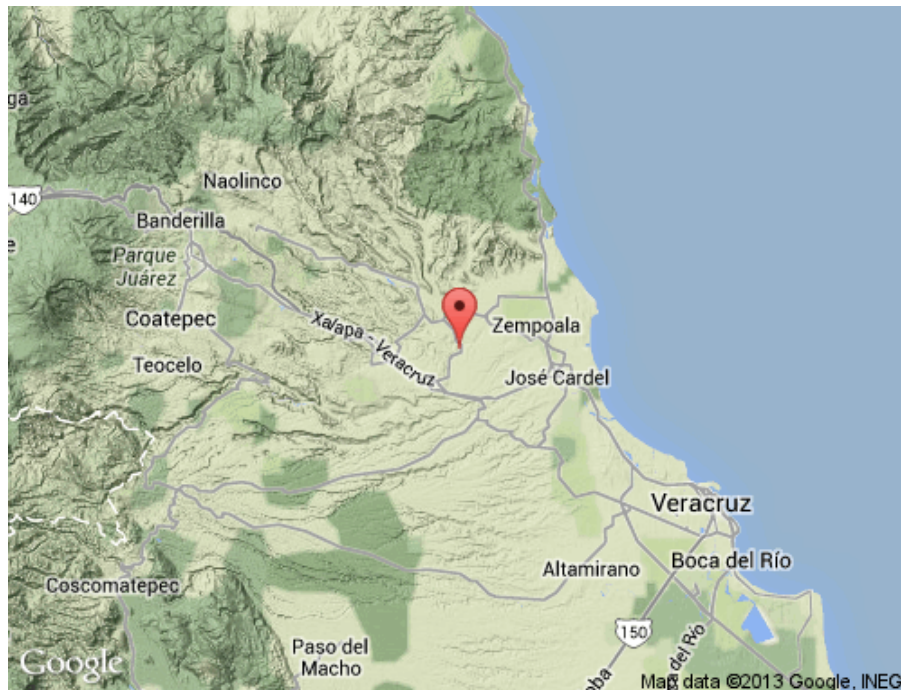


Figura. 4. Localización geográfica del ejido Arroyo de Piedra, Actopan, Ver.

7.3.2 Población

La comunidad de Arroyo de Piedra tiene 417 habitantes de los cuales 205 (49.16 %) son hombres y 212 (50.84 %) son mujeres. La relación mujeres/hombres es de 0.945. El índice de fecundidad de la población femenina es de 2.52 hijos por mujer. La población mayor de 18 años es de 270. El 71.48 % de la población mayor de 12 años está casado o unido en pareja.

Para alojar a sus habitantes, Arroyo de Piedra cuenta con 109 viviendas, de las cuales el 100 % es propiedad de sus moradores. En esta localidad hay 3 personas mayores de 5 años que hablan una lengua indígena y también dominan el español.

El grado medio de escolaridad en Arroyo de Piedra es de 5.11, la media de escolaridad en el municipio es de 5.26.

La población económicamente activa en la localidad de Arroyo de Piedra es de 119 (28.53 % de la población total) personas, las que están ocupadas se reparten por sectores de la siguiente forma:

a) Sector Primario: 78 (65.54 %) (Municipio: 60.69 %) Agricultura, Explotación forestal, Ganadería, Minería, Pesca.

b) Sector Secundario: 10 (10.8 %) (Municipio: 14.56 %) Construcción, Electricidad, gas y agua, Industria Manufacturera.

c) Sector Terciario: 28 (30.24 %) (Municipio: 24.75 %) Comercio, Servicios, Transportes Nivel de ingresos de la localidad de Arroyo de Piedra (número de personas y % sobre el total de trabajadores en cada rango). En el Cuadro 3 se muestra la cantidad de personas económicamente activas y su nivel de ingresos.

Cuadro 3. Clasificación del nivel de ingresos económicos en la localidad de Arroyo de Piedra, Ver., según el número de salarios mínimos.

Numero de salarios	Cantidad de personas	Porcentaje
0 (sin ingresos):	13	(11.61 %)
1	9	(8.04 %)
1-2	54	(48.21 %)
2-5	61	(27.68 %)
5-10	4	(3.57 %)
10+	1	(0.89 %)

7.4 Inyectores de fertilizantes

Existen diferentes tipos de inyectores de fertilizante diseñados para sistemas de riego. Dependiendo de la carga de presión a utilizar, los sistemas de riego se pueden clasificar como se menciona en el Cuadro 2. Estos se utilizan en sistemas de riego de baja presión o alta presión. En su gran mayoría se desarrollan inyectores para sistemas de alta presión por presentar una menor pérdida de esta durante su uso. Los inyectores más comunes son los que se emplean por “by pass” o los de tipo Venturi; pero existen pocos diseños para sistemas de baja presión.

7.4.1 Inyector de fertilizantes tipo Venturi. Funcionamiento

Un inyector del tipo Venturi genera succión debido al diferencial de presión negativa que se produce entre su entrada y su salida al reducirse su diámetro de garganta en su parte mediana, esto acelera el fluido. La presión de entrada de energía se traduce en energía cinética cuando el fluido pasa a través de la garganta del inyector. A medida que aumenta la presión de entrada y la velocidad de descarga, aumenta la energía cinética en la garganta. Cuando llega a cierto valor, la energía de presión en la garganta desaparece por completo y una presión negativa se produce mientras se estabiliza. La velocidad de flujo del fluido aumenta significativamente a medida que disminuye la presión de entrada. La energía cinética y la pérdida de carga en la garganta también aumenta muy rápidamente a medida que aumenta la velocidad de fluido (Fan y Kong, 2013).

Los principios que rigen el funcionamiento de estos dispositivos se basan en leyes universales de la mecánica de fluidos. Existe mucha información de las consideraciones generales que se deben tomar en cuenta para su diseño y construcción (Lewit, 1952). Aunado a lo anterior, Replogle y Wahlin (1994) mencionaron que existen métodos económicos para su construcción utilizando tuberías de plástico, los cuales no requieren de una calibración especial para las prácticas agrícolas.

7.4.2 Instalación

En la práctica, los sistemas de riego de baja presión se construyen a partir de diámetros de tubería (D) relativamente grandes (mayores a 6”), por lo que es esencial que el flujo de entrada al Venturi sea uniforme. Por tanto, es deseable un largo tramo continuo con tubería recta aguas arriba y aguas abajo de la localización del Venturi para mejorar la precisión del inyector. La longitud de tramo recto recomendada es aproximadamente 10 veces el diámetro de la tubería (10D) aguas arriba y 4 veces el diámetro de la tubería (4D) aguas abajo. Los requerimientos de tubería recta dependen del accesorio aguas arriba del inyector como lo muestra el Cuadro 4.

Cuadro 4. Valor de la relación de diámetros ($\beta=d/D$) en función de la longitud de tramo recto aguas arriba para la instalación de accesorios antes del inyector tipo Venturi (IMTA, 2011).

Accesorio y/o conexión	Valor de β				
	0.40	0.50	0.60	0.70	0.75
Codo simple	1.5(D)	1.5(D)	3(D)	4(D)	4.6(D)
Dos codos en el mismo plano	1.5(D)	2.5(D)	3.5(D)	4.5(D)	4.5(D)
Dos codos en planos distintos	0.5(D)	8.5(D)	17.5(D)	27.5(D)	29.5(D)
Reducción	2.5(D)	5.5(D)	8.5(D)	10.5(D)	11.5(D)
Expansión	1.5(D)	2.5(D)	3.5(D)	5.5(D)	6.5(D)
Válvula de globo abierta	2.5(D)	3(D)	3.5(D)	4(D)	4.5(D)
Válvula de compuerta abierta	2.5(D)	3.5(D)	4.5(D)	5.5(D)	5.5(D)

7.4.3 Diseño

Existen dos variables geométricas comunes en todos los inyectores de tipo Venturi: el diámetro de la tubería (D) y el diámetro del estrangulamiento o garganta (d), la relación d/D , se conoce como relación de diámetros y se simboliza con la letra griega β (beta) (IMTA, 2011). El cuadro 5 muestra los valores extremos para D y β para un inyector tipo Venturi para riego a baja presión.

Cuadro 5. Valor del diámetro (D) y relación de diámetros (β) para un inyector tipo Venturi (IMTA, 2011).

Variable	Valor
D_{\min} (mm)	200
D_{\max} (mm)	1200
β_{\min}	0.40
β_{\max}	0.70

Algunos autores señalan que el diseño para el inyector tipo Venturi está definido con un ángulo convergente (Θ_c) de 21° y 10.5° (Reader-Harris *et al.*, 2001) y el divergente (Θ_d) 5° y 7° . Empresas como Mazzei Vicamp y otros ya comercializan al mercado los inyectores de fertilizante con este diseño (VICAMP, 2002) pero en tamaños pequeños, sin embargo investigadores como Zárate (1995) señalaron que se encuentran altos rendimientos en el uso de energía (menores pérdidas de carga), al realizar la succión de un segundo fluido con un Θ_c de 7.5° contra Θ_d de 5° y 7° comerciales.

7.4.4 Evaluación

Yuan *et al.* (2000) evaluaron el efecto del cambio de temperatura química en la tasa de flujo de inyección y la velocidad con que es inyectada. Determinaron que los inyectores del tipo Venturi utilizados para productos químicos indisolubles adquieren mayor velocidad por la densidad de la mezcla y el aumento en su temperatura, pero el uso de éstos productos indisolubles es contraproducente, ya que existe una mayor tendencia al deterioro del medio ambiente y a la afectación en los cultivos por estar propensos a quedarse en la superficie.

7.4.5 Eficiencia

Neto y de Melo (2004) mencionaron que la implementación de inyectores tipo Venturi comerciales no supera la eficiencia obtenida por un sistema presurizado con bombas de chorro convencionales, sin embargo, mencionan que su construcción a medida supera el doble o triple la eficiencia de un tubo Venturi comerciales, obteniéndose así un mejor costo beneficio, y acercándose a la eficiencia desarrollada con una bomba. También

Lima-Neto (2006) evaluó inyectores del tipo Venturi. Determinó que la mayor eficiencia en su uso se obtiene cuando el fluido a succionar tiende a ser más denso.

Por otra parte, la tasa de inyección tiene un efecto significativo en la uniformidad de la distribución del fertilizante (Regina *et al.*, 2003) y en este sentido los inyectores tipo Venturi son los que demuestran mayor uniformidad comparados con otros métodos de inyección (Li *et al.*, 2006).

7.4.6 Construcción

Vargas *et al.* (2008) dijeron que los inyectores tipo Venturi son viables técnicamente y su costo de construcción es relativamente bajo. Se pueden encontrar en sus trabajos de evaluación relaciones que muestran los principios del efecto Venturi, destacando algunas características primordiales que se deben tomar en cuenta en su diseño tales como: el ángulo convergente, ángulo divergente y diámetro de garganta. Probaron diferentes ángulos para la construcción de estos dispositivos, pero su investigación se utilizó en sistemas de riego por goteo donde los diámetros de tubería son relativamente pequeños, además que necesitan presurizarse sus líneas de tuberías.

Para iniciar su diseño se debe determinar primeramente el gasto del dispositivo utilizando la siguiente ecuación (IMTA, 2011):

$$Q = \frac{Cd}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2gh_0} \quad (12)$$

Dónde:

Q: Caudal (m³/s); Cd: Coeficiente de descarga (adimensional);

β :relación de diámetros d/D (adimensional); (d: diámetro de garganta del inyector (m) y D diámetro de entrada (m); d: diámetro de garganta (m); g: Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²); y h₀: Presión diferencial (kg/cm²).

La ecuación es aplicable a flujos no compresibles (como el agua) y con las siguientes condiciones:

1. El flujo debe ser homogéneo; 2. Debe conocerse con precisión el valor de la presión diferencial. 3. El conducto debe trabajar a presión (tubo lleno).

7.4.7 Presión

Baylar *et al.* (2009) señalaron que con una mínima presión diferencial existente en el dispositivo se genera la succión suficiente para utilizarlo, la cual se puede calcular previo a su construcción si se dispone de un software para su simulación, en cuyo caso los resultados reales y la simulación serán similares.

Las diferencias de presión crítica (límite donde deja de ser eficiente el inyector) y presión máxima de funcionamiento están en relación lineal con la presión de entrada. La tasa de flujo de entrada del inyector Venturi aumenta con el incremento de la presión de entrada o la diferencia entre las presiones de entrada y salida. Si esta presión diferencial es pequeña, el diámetro de la toma de inyección debe disminuirse para aumentar la relación de la tasa de inyección. De igual manera el diámetro de la garganta y los ángulos convergente y divergente deben de ser incrementados (Yan *et al.*, 2010). Con esto se consigue un mejor rendimiento en el inyector.

Kumara *et al.* (2012), mencionaron que el tubo Venturi es el método más común para aplicar fertilizantes. A pesar de esto existe poca información al respecto.

La pérdida de presión producida por la utilización de inyectores Venturi durante la inyección de fertilizante disminuye la calidad de la fertilización y la uniformidad del riego (Yan *et al.*, 2012), por lo que se deben de optimizar sus parámetros estructurales para obtener un mejor rendimiento y evitar dicha pérdida.

7.4.8 Rendimiento

El diámetro de garganta tiene influencia sobre el comportamiento del flujo interno de la garganta del inyector. El ángulo divergente en el rendimiento de inyección y la

eficiencia. La relación de los ángulos de convergencia y de divergencia tiene más influencia en el rendimiento de inyección que el diámetro de la garganta. El mejor rango de la relación de los ángulos convergente y divergente es de 1:2 y 1:3. Estos nos proporcionan la máxima eficiencia de inyección (Yan y Chu, 2011).

Los parámetros hidráulicos como son el ángulo de convergencia, el diámetro de garganta y el ángulo de divergencia se pueden determinar mediante software de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) (Sun y Niu, 2012; Perumal y Krishnan, 2013). La relación de contracción de la garganta es el principal factor que influye en el rendimiento del inyector Venturi (Sun y Niu, 2012). Este se correlaciona positivamente con la velocidad de salida, y negativamente con la presión crítica, la presión mínima en el tubo, el coeficiente de pérdida de carga locales y la relación de absorción de fertilizante.

7.4.9 Succión del fertilizante

Han *et al.* (2013) demostraron que la cantidad de succión de fertilizantes y la descarga de salida se ven afectados por la presión de entrada y la presión de salida directamente. También descubrieron que un dispositivo diseñado a medida obtiene mejor rendimiento que uno de marca comercial.

Una deformación dinámica puede producirse debido a efectos de cavitación y puede dañar nuestro material del cual está construido el inyector, por lo que debe tenerse en cuenta que la cavitación crítica puede ocurrir en un inyector Venturi cuando la presión de entrada está por debajo de los 0.20 MPa (Yan *et al.*, 2013).

7.4.10 Simulación

Con el fin de reducir el efecto en la diferencia de presión entre la entrada y la salida requerida por el dispositivo inyector tipo Venturi, y mejorar la eficiencia de inyección, Yan *et al.* (2013), concluyeron que la mejor opción para calcular los parámetros

estructurales ideales es la simulación por computadora. Esta nos puede ayudar a calcular la tasa de flujo de inyección del dispositivo, misma que se logra con una presión constante en la entrada; por lo que se recomienda implementar una válvula reguladora de presión aguas arriba antes de instalar el dispositivo Venturi a una distancia tal, que se eviten turbulencias en su interior.

7.4.11 Uniformidad en aplicación del fertilizante

Para poder realizar una fertilización de tasa variable con inyectores Venturi, se debe implementar un control por medio de un modulador de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés), que garantice la correcta aplicación del fertilizante (Li *et al.*, 2012). Li *et al.* (2013) concluyeron que el dispositivo de inyección tipo Venturi es el dispositivo ideal para la fertirrigación, debido a su estructura simple, económica, viable, y su fácil construcción. Sin embargo, para lograr una uniformidad en la aplicación de fertilizantes, se debe de complementar un sistema que incluya un circuito de control de lazo cerrado (Proporcional Integral Derivativo, PID), mismo que garantiza una mezcla homogénea durante la aplicación.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

8.1 Metodología

La presente investigación se desarrolló en seis etapas, las cuales se mencionan brevemente a continuación y se describen a detalle más adelante.

Etapas:

- 1) Estado del sistema de riego por multicompuertas;
- 2) Diseño del prototipo;
- 3) Simulación;
- 4) Análisis de datos;
- 5) Conclusiones estadísticas; y
- 6) Construcción.

Etapa 1: En esta etapa se realizaron visitas a campo para conocer el funcionamiento del sistema de riego de baja presión por multicompuertas. Los datos de los diámetros de tuberías, timbraje, cargas hidráulicas y gasto se tomaron de estudios previos del Proyecto “El Manzano”.

Etapa 2. El diseño de los prototipos inyectores de fertilizante tiene como fundamento el método científico, con base en las ecuaciones matemáticas de mecánica de fluidos como la Ecuación de Continuidad, el Teorema de Bernoulli y el principio del tubo Venturi. Una aplicación de estos principios se demostró en un trabajo realizado por Vargas *et al.* (2008).

Se diseñaron 20 prototipos de inyectores de fertilizante tipo Venturi con características diferentes, definidas por los ángulos convergente, divergente y los diámetros de entrada, salida y garganta. Se realizaron modelos en tercera dimensión (3D) para cada uno de los prototipos. De acuerdo a la bibliografía consultada se utilizaron los ángulos convergentes de 21°, 10.5° y 7.5° recomendados para inyectores pequeños empleados

en riego por goteo (Zárate, 1995; Vargas *et al.*, 2008). Asimismo, se agregó un cuarto grupo con un ángulo convergente de 16°, tal como se muestra más adelante en el Cuadro 8.

A continuación se seleccionaron los cuatro prototipos que demostraron la mayor eficiencia en la simulación, tomando en cuenta como parámetro la velocidad desarrollada a la salida del dispositivo, debido a que está directamente correlacionada con el gasto y la presión.

Etapa 3. Mediante simulación, se realizaron pruebas individuales para la selección de componentes como el diámetro y el ángulo convergente y divergente correspondiente. El diámetro de garganta se definió considerando el gasto mínimo requerido del sistema de riego que es de 35 l·s⁻¹. La pérdida de energía por fricción depende de la velocidad del flujo, la viscosidad del líquido y el material con el cual está fabricado el tubo; por tanto, se consideró el mayor diámetro posible para disminuir dicha pérdida. De acuerdo a lo anterior, el diámetro seleccionado para la entrada y salida del inyector fue de 6", 3" para el diámetro de garganta y 2" para el puerto de succión del fertilizante.

Para incluir en las simulaciones las propiedades físicas y químicas de las mezclas de fertilizante a utilizar con estos inyectores, se realizó un análisis en laboratorio para identificar los valores de densidad, viscosidad, y temperatura.

Se realizaron simulaciones a diferentes temperaturas con cada uno de los cuatro inyectores, utilizando las tres soluciones y el testigo agua. La composición de dichas soluciones, así como los resultados de las comparaciones, entre ellas y el testigo, se mencionan adelante.

Etapa 4 y 5. Posteriormente se probaron los cuatro prototipos con estas soluciones de mezcla de fertilizante. Como criterio de selección se empleó el método estadístico de comparación de medias a través de un análisis de varianza de las velocidades

registradas por cada prototipo a la salida del inyector. El conjunto de datos se recolectó por medio de las iteraciones de la simulación, con un IC del 95 % y un valor de $\alpha=5$ %.

Este experimento se llevó a cabo mediante un arreglo factorial alojado en un diseño experimental completamente al azar. Los factores evaluados fueron los ángulos convergente y divergente del Venturi mediante los diferentes modelos (M2, M11, M14 y M15). Otros factores que se evaluaron fueron la temperatura y las soluciones de fertilizante incluyendo al testigo, con siete niveles (15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 °C) y 4 (S1, S2, S3 y agua).

Se estimó un tamaño de muestras aleatorias de 1000, mismas que equivalen al número de iteraciones en cada simulación para dichas pruebas. Los análisis estadísticos se realizaron con el software *Statistica V10* ®.

Con las soluciones incluidas en las simulaciones, se seleccionó el prototipo que mostró una mayor velocidad de fluido a la salida del inyector. Se compararon los resultados y se encontraron diferencias significativas entre tratamientos del factor “soluciones” al 5 %, pero no al 1 %. Sin embargo, los factores “modelos” y “temperatura”, mostraron diferencias significativas al 5 y al 1 %.

Etapa 6. Una vez seleccionado el modelo del inyector que demostró mayor eficiencia, se procedió a su construcción. Se fabricó el prototipo a escala real utilizando tuberías y acoplamientos de PVC hidráulico, fibra de vidrio para su moldeado y resinas especiales, las cuales mantienen unidas las piezas y soportan la presión hidráulica.

8.1.1 Estado del sistema de riego por multicompuertas

Para determinar el estado del sistema de riego con tubería de baja presión por multicompuertas se tomaron las variables considerando las condiciones actuales del sistema del Proyecto “El Manzano”. De éste se consiguieron los datos de las variables físicas de caudal, presión, nivel, diámetro de tubería, altura, pendiente y timbraje.

8.1.2 Diseño del prototipo

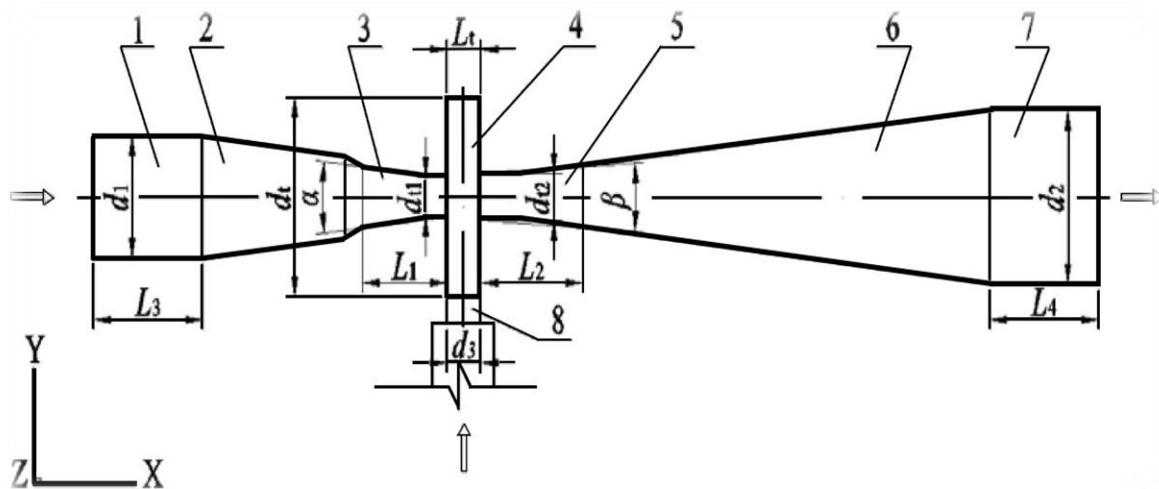
Después de obtener las variables mencionadas en la etapa anterior, se empleó la ecuación del principio del tubo Venturi.

Los cálculos se realizaron con base en las fórmulas explicadas en el capítulo 7.

Se modelaron 20 prototipos en 3D con el programa de cómputo *SolidWorks 2014®*, en donde se realizaron los dibujos técnicos.

Con los resultados obtenidos, se determinaron los parámetros óptimos que se utilizaron en el diseño final.

De acuerdo a la hipótesis y el objetivo particular dos (H_2 y OP_2), se llevó a cabo el diseño de 20 prototipos de inyectores de fertilizante tipo Venturi, los cuales se variaron en ángulos convergentes, divergentes, diámetros de entrada y diámetros de garganta, de acuerdo a la estructura sugerida por Yan *et al.* (2012), como se muestra en la Figura 5.



1. Conexión de entrada; 2. Zona de estrechamiento II; 3 Zonas de estrechamiento I;
4 Garganta; 5 Difusor parte I; 6 Difusor parte II; 7 Conexión de salida; 8 Entrada del Inyector.

Figura 5. Estructura interna del flujo en un inyector tipo Venturi. (Fuente: Yan *et al.*, 2012).

8.1.3 Matriz de diseño de los modelos

Como resultado del diseño, se definieron las características de los 20 modelos de prototipos inyectoros de fertilizante, utilizando como referencia la literatura mencionada en el capítulo anterior. Ésta sugiere ángulos de convergencia de 21° , 10.5° y 7.5° , los cuales han demostrado mayor eficiencia en otros estudios. Se agregó un cuarto grupo de modelos que parten de un ángulo convergente de 16° . Este ángulo se seleccionó aleatoriamente para ser probado ya que entre 21° y 10.5° no existen referencias de pruebas realizadas.

En el Cuadro 6 se muestra la tabla de diseño empleada en el software *SolidWorks* 2014® para realizar los 20 modelos tridimensionales de dispositivos inyectoros de fertilizante que se sometieron a simulación para compararse entre sí.

Para ilustrar el Cuadro 6 se anexa la Figura 6 que muestra uno de los prototipos modelados en 3D, que se sometieron a las simulaciones con el fluido de agua y posteriormente con las soluciones de mezcla probadas en laboratorio.

Cuadro 6. Tabla de diseño utilizada en SolidWorks 2014® que define los modelos tridimensionales a evaluar mediante simulación en SolidWorks FlowSimulator 2014®.

ÁNGULO PRINCIPAL	MODELO	Ángulo convergente (°) (θ_c)	Ángulo divergente (°) (θ_d)	Diámetro entrada (pulgadas) (D)	Diámetro Garganta (pulgadas) (d)
21°	M1	21	7	6	3
	M2	21	6	6	3
	M3	21	8	6	3
	M4	21	9	6	3
	M5	21	10	6	3
10.5°	M6	10.5	6	6	3
	M7	10.5	7	6	3
	M8	10.5	8	6	3
	M9	10.5	9	6	3
	M10	10.5	10	6	3
7.5°	M11	7.5	6	6	3
	M12	7.5	7	6	3
	M13	7.5	8	6	3
	M14	7.5	9	6	3
	M15	7.5	10	6	3
16°	M16	16	6	6	3
	M17	16	7	6	3
	M18	16	8	6	3
	M19	16	9	6	3
	M20	16	10	6	3

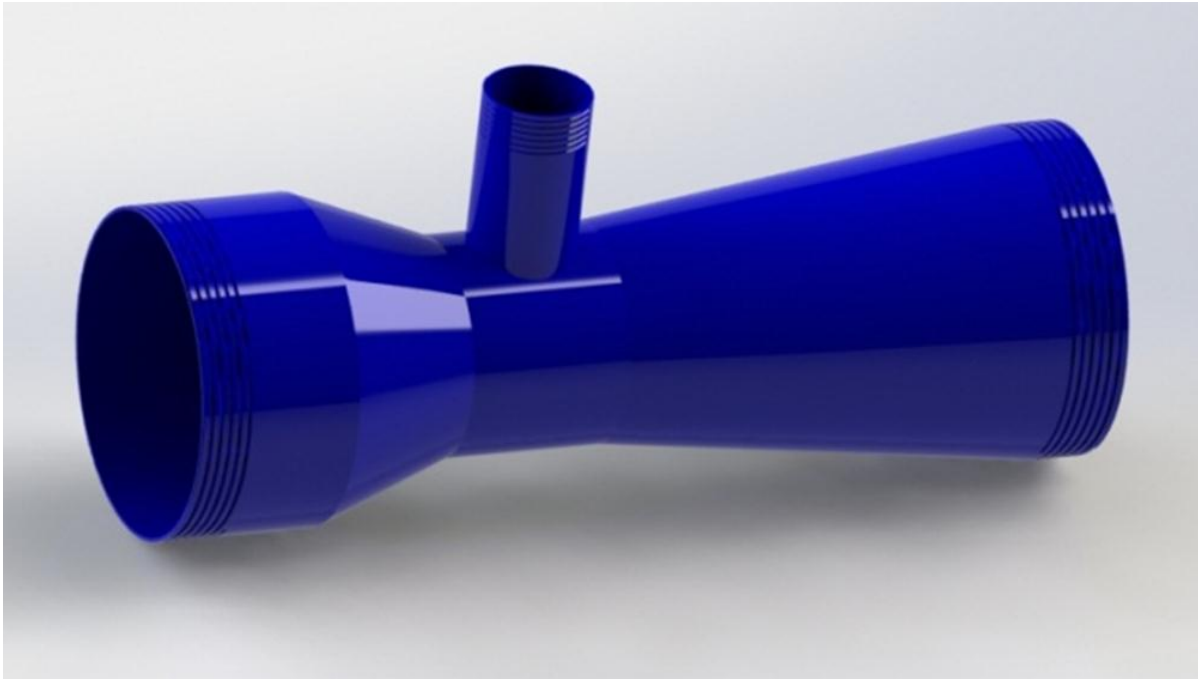


Figura 6. Modelado en 3D de uno de los prototipos inyector de fertilizante realizado con el software *Solidworks* 2014 ®.

8.1.4 Simulación

Se realizaron simulaciones y se evaluó el funcionamiento de los 20 prototipos con el software de simulación *SolidWorks FlowSimulator* 2014®.

En primera instancia se corrieron las simulaciones con los datos del diseño a los 20 prototipos de inyector considerando una temperatura de 20 °C solo con el fluido agua. Con lo anterior, se obtuvieron datos de las iteraciones por cada simulación. Estos datos se exportaron a un formato de texto separado por comas para su tratamiento estadístico.

Mediante un análisis de varianza se seleccionaron cuatro modelos que mostraron mayor velocidad desarrollada a la salida del inyector (M2, M11, M14 y M15). Se continuó el experimento con estos modelos y el resto fueron descartados.

Con la intención de probar dichos modelos en condiciones reales, se realizaron tres mezclas de fertilizantes con soluciones diferentes, definidas con base en las dosis recomendadas por los productores que realizan fertirriego con tecnología israelí (líneas hidráulicas presurizadas a través de bombeo). Estas se muestran en el Cuadro 7.

Estas dosis se analizaron en laboratorio para obtener las variables densidad, viscosidad y temperatura, que sirvieron para alimentar el simulador con los datos requeridos. Lo anterior, permitió establecer una comparación de eficiencia entre los prototipos, utilizando soluciones de fertilizantes en contraste con el testigo agua.

Debido a que en los registros climáticos, de los últimos 30 años, en la estación Actopan Clave Clicom 30003, las temperaturas oscilaron en un rango de 5 a 43.5 °C (CONAGUA, 2014), se consideró realizar en adelante las simulaciones que incluyeron la succión de las dosis de fertilizantes en intervalos de temperatura de 5 °C. Los grupos de temperatura del fluido fertilizante que entra por el puerto de succión quedaron establecidos a 15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 °C.

Cuadro 7. Soluciones de las mezclas agua-fertilizante analizadas en laboratorio para determinar densidad, viscosidad y temperatura.

SOLUCIÓN	UREA (g)	TRIPLE 17 (g)	AGUA (l)
S1	63.4	196.0	1
S2	90.5	245.0	1
S3	108.6	318.6	1

8.1.5 Análisis de datos

Con los datos exportados se realizaron análisis de varianza con el software *Statistica* V10 ®. Se determinaron las diferencias significativas de las velocidades desarrolladas en los modelos. Se compararon los resultados y se seleccionó el prototipo que mostró mayor eficiencia.

8.1.6 Construcción

Para la construcción se utilizó plástico PVC, fibra de vidrio y resinas epóxicas.

Se utilizaron dos conectores roscados de PVC hidráulico de 6" para los extremos del inyector. Se construyó una "T" de 3" con reducción de 2" en la toma central, utilizando fibra de vidrio, misma que constituye el puerto de entrada del fertilizante y la parte de reducción de garganta. Para la unión de dichas tuberías se requirió un molde de papel encerado en cada extremo, el cual sirvió de soporte para los ángulos convergente y divergente, de 7.5° y 10°.

Después de ensamblar las uniones y el cuerpo construido de fibra de vidrio, se dejaron secar al sol durante 5 horas. Una vez secas, se lijaron. Por último se pulió todo el prototipo, se le dio un acabado con pasta automotriz para resanar las uniones y el resto de la pieza.

Finalmente se pintó el prototipo completo con un compresor y pistola de aire de gravedad de alta presión.

La validación del prototipo se llevará a cabo en una etapa posterior, con un grupo de productores de caña de azúcar incluidos en el Proyecto "El Manzano" en el Módulo de Riego II-1 Actopan en el ejido Arroyo de Piedra, Ver., perteneciente al municipio de Úrsulo Galván, Ver.

8.2 Operacionalización de la hipótesis general

$$EF=f(FH + CPS)$$

Dónde:

EF: Eficiencia de los prototipos inyectoros.

FH: Factores Hidráulicos.

CPS: Carga de Presión del Sistema de Riego.

A continuación, el Cuadro 8 muestra las variables y sus unidades utilizadas para explicar la hipótesis general.

Cuadro 8. Indicadores para la operacionalización de la hipótesis general.

	Indicador	Variables	Unidades
EF	Eficiencia (%)	Tasa total de presión	adimensional
		Capacidad de Inyección	L·s ⁻¹ m ³ /s
		Absorción de fertilizante	
FH	Velocidad (m/s)	ángulo convergente	grados
		ángulo divergente	grados
		diámetros de garganta	pulgadas L s ⁻¹
		Gasto	
CPS	Presión	Tiempo	s
		Densidad del fluido	kg/m ³
		Velocidad	m/s
		θ de las tuberías	pulgadas
		Longitudes	m
		Altura	m
		Presión Hidráulica Diferencial	kg/cm ²

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 Cálculos

En el diseño de los inyectores de fertilizante fue fundamental conocer las cargas de presión hidráulica y los gastos del fluido. Estos sirvieron como parámetros para determinar otras propiedades de los fluidos a los cuales van estar expuestos los inyectores. Con base en estos dos factores, se calculó la cantidad de absorción de fertilizante, la velocidad del fluido, la tasa total de presión y la eficiencia del inyector.

Para el diseño de los prototipos y cumplir con el objetivo particular uno (OP₁), se tomó en cuenta la carga de presión hidráulica existente en el sistema de riego de baja presión por multicompuertas como se mencionó en materiales y métodos. Esta fue de 0.7 kg/cm², y un gasto del sistema de 35 l·s⁻¹ tomados del "Proyecto El Manzano".

Todos estos cálculos fueron necesarios para cubrir la hipótesis y objetivos particulares H₁ y OP₁. Las fórmulas para los cálculos fueron descritas en el Capítulo 7. Las variables calculadas que sirvieron para el desarrollo los 20 prototipos en las simulaciones, se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Resultados de las variables calculadas con las que se llevó a cabo el diseño de los prototipos y las simulaciones en *SolidWorks FlowSimulator* 2014 ®.

Variable	Resultado
Cantidad de absorción del fertilizante en el puerto de entrada	q=18 l·s ⁻¹
Gasto	Q=29 l·s ⁻¹
Eficiencia	η= 77.5 %
Tasa total de presión	N=1.25
Capacidad de inyección	M= 0.62 l·s ⁻¹

9.2 Simulaciones

En el diseño de dispositivos, una de las técnicas que permite hacer más eficiente el tiempo en la construcción y, a su vez, reducir los costos de materiales y mano de obra, es la simulación. Esta técnica de simulación fue empleada para el desarrollo de los prototipos inyectores de fertilizante mediante el método de dinámica de fluidos computacional (CFD). Para esto se utilizó el software de simulación *Solidworks FlowSimulator 2014*®, con las características de diseño mencionadas en el Cuadro 8.

Como primera etapa, se llevaron a cabo 20 simulaciones que contrastan con los 20 modelos diseñados para los prototipos inyectores de fertilizante. Se utilizó solo agua a una temperatura de 20 °C. La Figura 7 muestra una de las 20 simulaciones realizadas con las cuales se pudo realizar una comparación de medias entre las velocidades del fluido desarrolladas por cada prototipo.

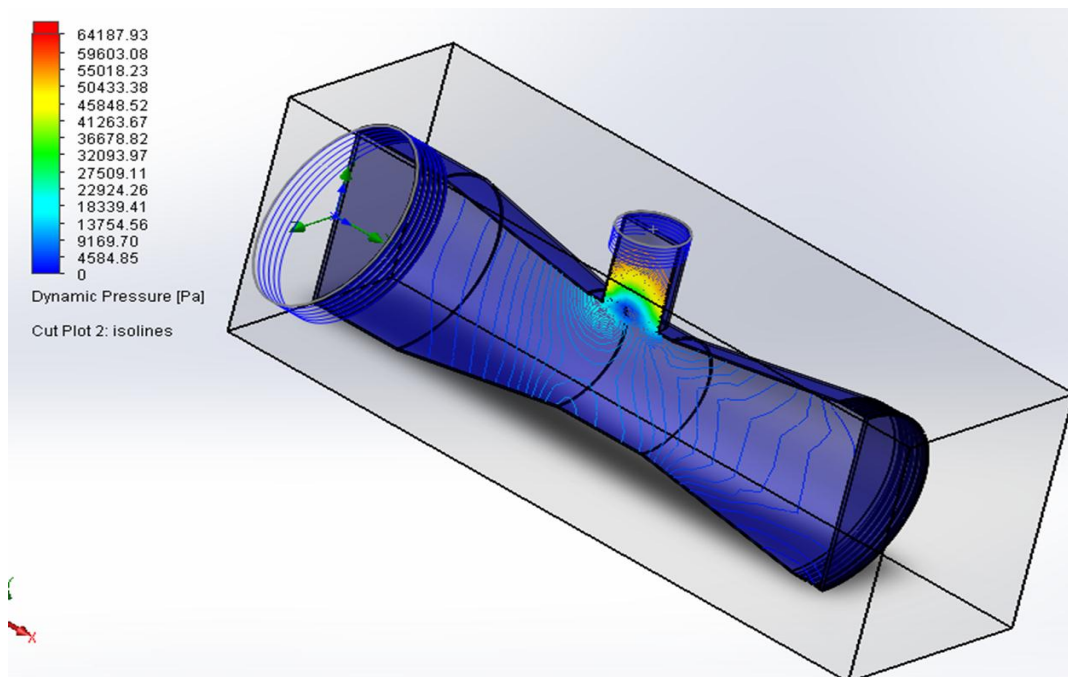


Figura 7. Simulación del funcionamiento de un prototipo mediante el software *Solidworks FlowSimulator 2014*®.

9.2.1 Selección de prototipos

Llevando a cabo el objetivo particular OP₃ y poder probar la hipótesis H₃, se realizó un análisis estadístico con datos provenientes de las simulaciones mencionadas en el párrafo anterior; para lo cual se utilizó el software estadístico *Statistica V10* ®.

A este conjunto de datos se le realizó una prueba de normalidad asumiendo H₀: los datos muestran una distribución normal. Los resultados fueron los siguientes: $t = 1.9272$, $df = 19998$, $p\text{-value} = 0.05396$. No se rechaza H₀, Los datos demostraron una distribución normal.

Se realizó una comparación de medias utilizando la técnica de análisis de varianza (ANOVA) con un intervalo de confianza del 95 %, encontrándose diferencias significativas entre las medias de velocidades de los 20 modelos.

La Figura 8 muestra la gráfica de la comparación de medias de los 20 modelos simulados con el fluido agua a una temperatura ambiente del fluido de 20°C, donde se puede observar, mediante el valor de p, que existen diferencias significativas entre las medias de las velocidades desarrolladas por cada modelo.

Para llevar a cabo la comparación de medias se propuso la hipótesis nula: H₀: $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_{20}$ en contraste con la hipótesis alternativa H₁: $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \mu_{20}$ con un intervalo de confianza IC=95 %, y un valor de $\alpha=0.05$.

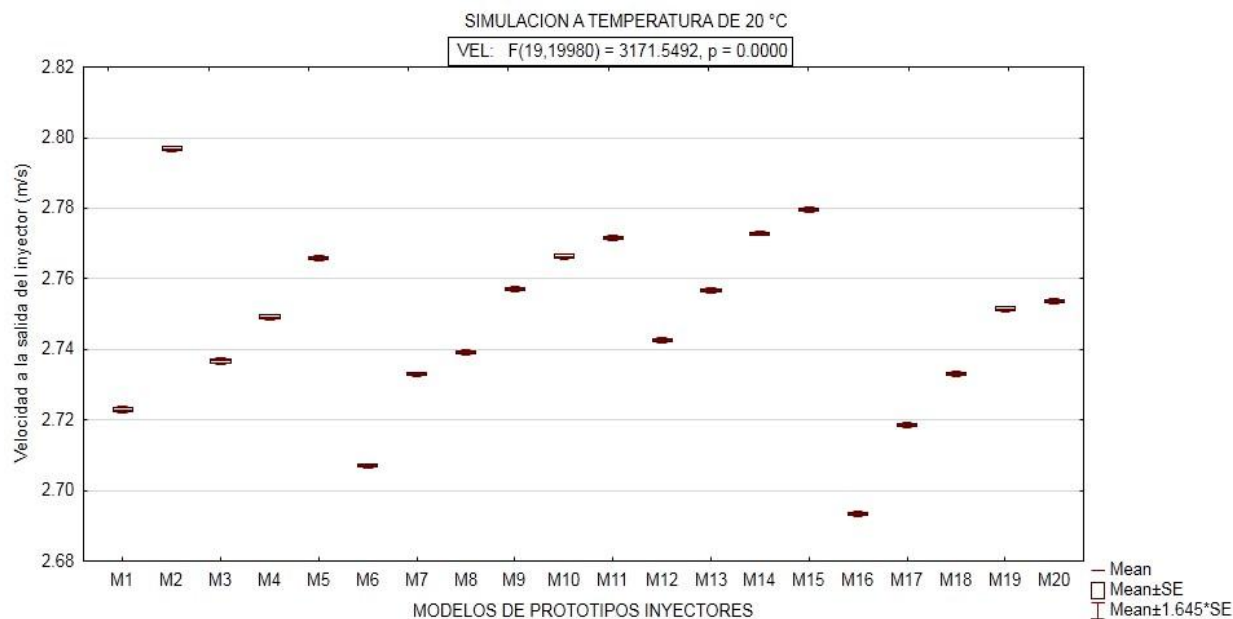


Figura 8. Gráfica de comparación de medias de velocidades desarrolladas en cada uno de los modelos de los prototipos simulados.

En el Cuadro 10 se detallan los resultados de la prueba de comparación de medias de las velocidades del fluido desarrolladas en cada prototipo.

Cuadro 10. Cuadro ANOVA de los 20 modelos de prototipos de inyectores simulados.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados de las medias	Valor de F	Probabilidad
MODELOS	19	12.27	0.6460	3172	<2e-16
Residuales	19980	4.07	0.0002		

Se rechazó H_0 ; al menos existe una velocidad promedio diferente, hay diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre las cantidades medias de los modelos de inyectores ($F=3172$, $gl=19999$, $p \leq 2e-16$).

Para determinar cuáles de los 20 modelos de los prototipos inyectores de fertilizante presentaron las mejores eficiencias, así como para poder seleccionar al menos tres

prototipos inyectoros de fertilizante, se realizó una prueba de Tukey que permitió establecer las diferencias y poder agrupar los modelos de acuerdo a sus medias.

El Cuadro 11 muestra los resultados de la prueba de Tukey para la agrupación de los modelos. Como se puede observar, destacan cuatro modelos con los cuales se trabajó hasta determinar el que mostró un mejor desempeño en relación con la velocidad promedio del fluido desarrollada a la salida del prototipo.

Cuadro 11. Agrupamiento de modelos de los prototipos de inyectoros de fertilizante de acuerdo a sus medias de velocidad.

ESTADÍSTICAS				PARÁMETROS		
Media	CV	EC Media	HSD	Df	Tr	StudentizedRange
2.747379	0.5194767	0.0002036897	0.002262184	19980	20	5.012372

MODELO	MEDIAS	GRUPOS
M2	2.796891	a
M15	2.779598	b
M14	2.772825	c
M11	2.771627	c
M10	2.766393	d
M5	2.765823	d
M9	2.757221	e
M13	2.756660	e
M20	2.753696	f
M19	2.751474	fg
M4	2.749231	g
M12	2.742583	h
M8	2.739102	i
M3	2.736710	j
M18	2.733090	k
M7	2.732917	k

9.2.2 Pruebas con agua

En esta etapa, ya teniendo identificados al menos cuatro modelos de prototipos (M2, M11, M14 y M15), mismos que pertenecen a los grupos A, B y C; se cumplió con el objetivo particular OP₃: identificar los modelos que mostrarán mejor desempeño.

Se continuaron con las simulaciones en estos cuatro modelos mediante el software CFD. Para dar realismo a las simulaciones, se tomó en cuenta el fluido agua como testigo y se comparó el desempeño de los cuatro prototipos utilizando las tres soluciones de fertilizante propuestas.

9.3 Soluciones de fertilizante

Como se mencionó anteriormente, los resultados de las simulaciones exigieron apegarse a las circunstancias incluyendo variables reales en ellas. Por tal motivo se consideró incluir mezclas de fertilizante con características que permitieran simular la succión del fluido a través del puerto de entrada, ubicado en los prototipos para tal fin. Esto conllevó a investigar las características del fluido compuesto por las soluciones de fertilizantes a utilizarse en conjunto con estos inyectores.

De acuerdo con Palma-López *et al.* (2000) y con los productores del sitio de estudio, se propusieron tres dosis de fertilizante utilizadas en agroecosistemas con caña de azúcar como se muestra en el cuadro siguiente:

Cuadro 12. Dosis de soluciones para aplicación de fertilizantes recomendadas por hectárea por año en caña de azúcar para fertirriego.

DOSIS	N (Kg)	P ₂ O ₅ (Kg)	K ₂ O (Kg)	H ₂ O (l)
D1	150	80	80	800
D2	200	80	80	800
D3	250	80	80	800

9.3.1 Cálculo de soluciones para las dosis de fertilizante

Con las dosis del Cuadro 12, se obtuvieron las soluciones equivalentes para las mezclas. En el Cuadro 7 se describieron los componentes para cada solución equivalente.

Estas soluciones se analizaron en laboratorio para determinar sus propiedades físicas: densidad, viscosidad y temperatura, mismas que sirvieron para ingresarlas al simulador a través del puerto de succión de fertilizante de cada prototipo.

9.3.2 Resultado del análisis de soluciones en laboratorio

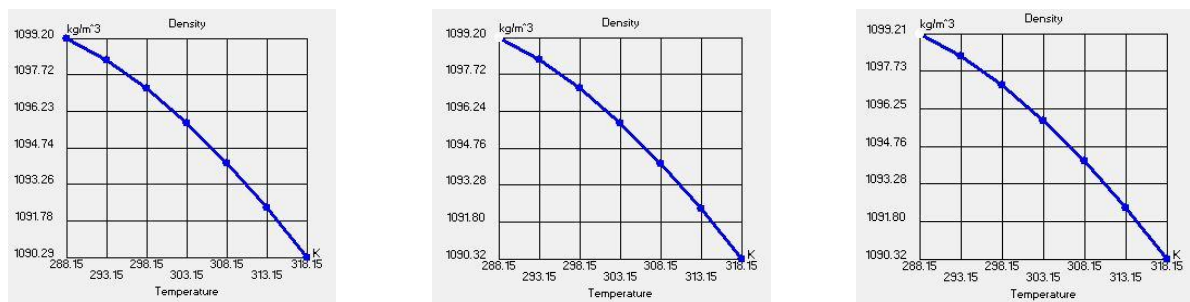
Como resultado del análisis en laboratorio de las soluciones mencionadas se obtuvo el Cuadro 13. Con base en la salinidad medida, se calculó la densidad de las soluciones.

Cuadro 13. Densidad calculada de las soluciones de fertilizante con base en la salinidad medida.

TEMP. (°C)	SALINIDAD (PPM)			DENSIDAD CALCULADA (g/cm ³)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
15	92.4	96.03	103	1099.2	1099.2	1099.21
20	91.4	93	100	1098.3	1098.3	1098.31
25	90	95	115.66	1097.14	1097.15	1097.16
30	79.5	103.9	113.86	1095.74	1095.76	1095.76
35	74	99	113.46	1094.12	1094.14	1094.15
40	67	100	111.7	1092.3	1092.32	1092.33
45	62	97	109.5	1090.29	1090.32	1090.32

9.3.3 Nomogramas de densidad Vs temperatura en muestras analizadas

Para comprender el comportamiento de las muestras al variarse las temperaturas se realizaron los siguientes nomogramas. La Figura 9 muestra una representación gráfica del comportamiento de las soluciones de mezcla agua-fertilizante a diferentes temperaturas con base en su densidad. Como se observa, el comportamiento es similar entre las tres soluciones.



a) Solución 1.

b) Solución 2.

c) Solución 3.

Figura 9. Nomogramas de densidad de las soluciones de fertilizante analizadas en laboratorio incluidas en las simulaciones.

9.4 Pruebas de simulación con soluciones de fertilizante

Después de incluirse las propiedades de densidad, viscosidad, calor específico y temperatura en el simulador, se realizaron 112 pruebas de simulación a los cuatro modelos seleccionados (28 pruebas por cada modelo). Con ellas se identificaron aquellos modelos que demostraron una mayor velocidad de fluido en su interior. Para esto, se variaron sus temperaturas desde los 15 hasta 45 °C como se indica en la Figura 10.

9.4.1 Comparación del agua Vs mezcla

Se comparó el desempeño de los cuatro modelos de prototipos inyectores de fertilizante, utilizando el fluido agua como testigo en el puerto de succión y las tres soluciones de fertilizantes propuestas. Para esto, se realizó una comparación de medias mediante un ANOVA. Se demostró que existen diferencias significativas al 1 % en el comportamiento de estas sustancias en cada uno de los prototipos inyectores, con valores de $F(11,100)=2.3843$, $p=0.0115$. La gráfica de la Figura 10 muestra los resultados de dicha comparación, donde se observa un mayor desempeño en el modelo 15 a 45 °C.

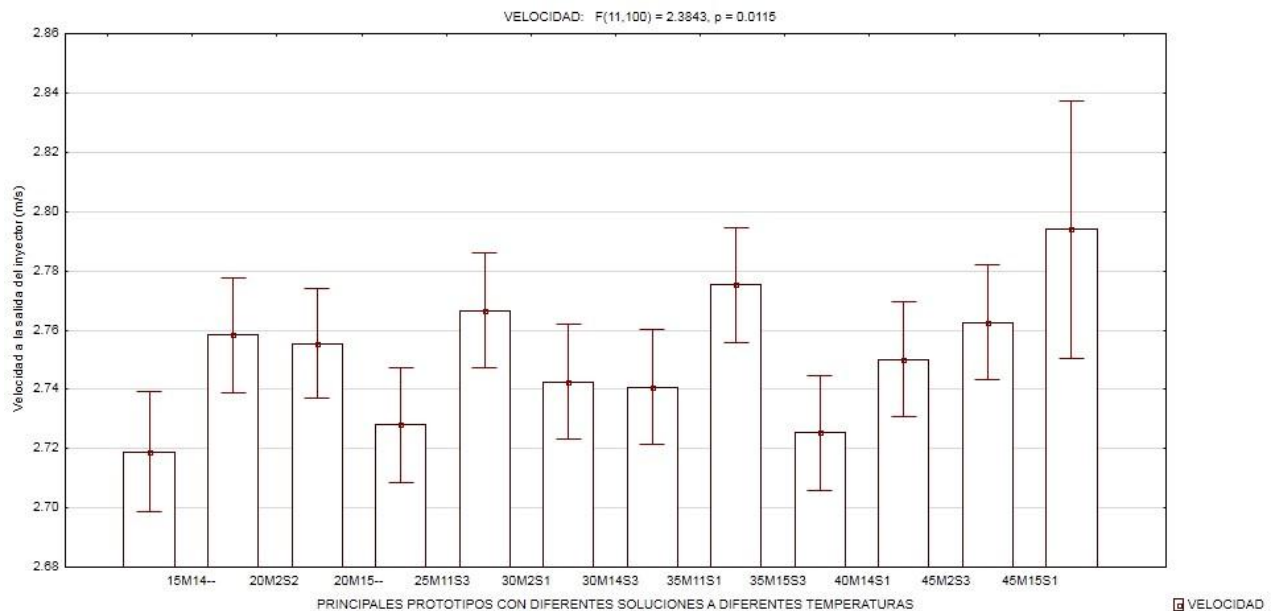


Figura 10. Comparación de medias de los prototipos con diferentes soluciones a diferentes temperaturas. La nomenclatura es la siguiente: el número que antecede es la temperatura, continúa con la letra M seguido de números que identifican el modelo. La letra S seguida de número es el tipo de solución. El símbolo – indica Agua.

9.4.2 Selección del prototipo a construir

Para la selección del modelo del inyector a construir, se graficaron los valores promedios de velocidades del fluido en los prototipos M2, M11, M14 y M15; probados con las dosis de fertilizante y con agua a 20 °C. La Figura 11 muestra la gráfica correspondiente.

En la Figura 11 se muestra el comportamiento de los cuatro modelos, en la que se observa que el modelo 15 sobresale de los otros tres modelos, comportándose de manera similar para las dosis de fertilizante succionadas y el agua.

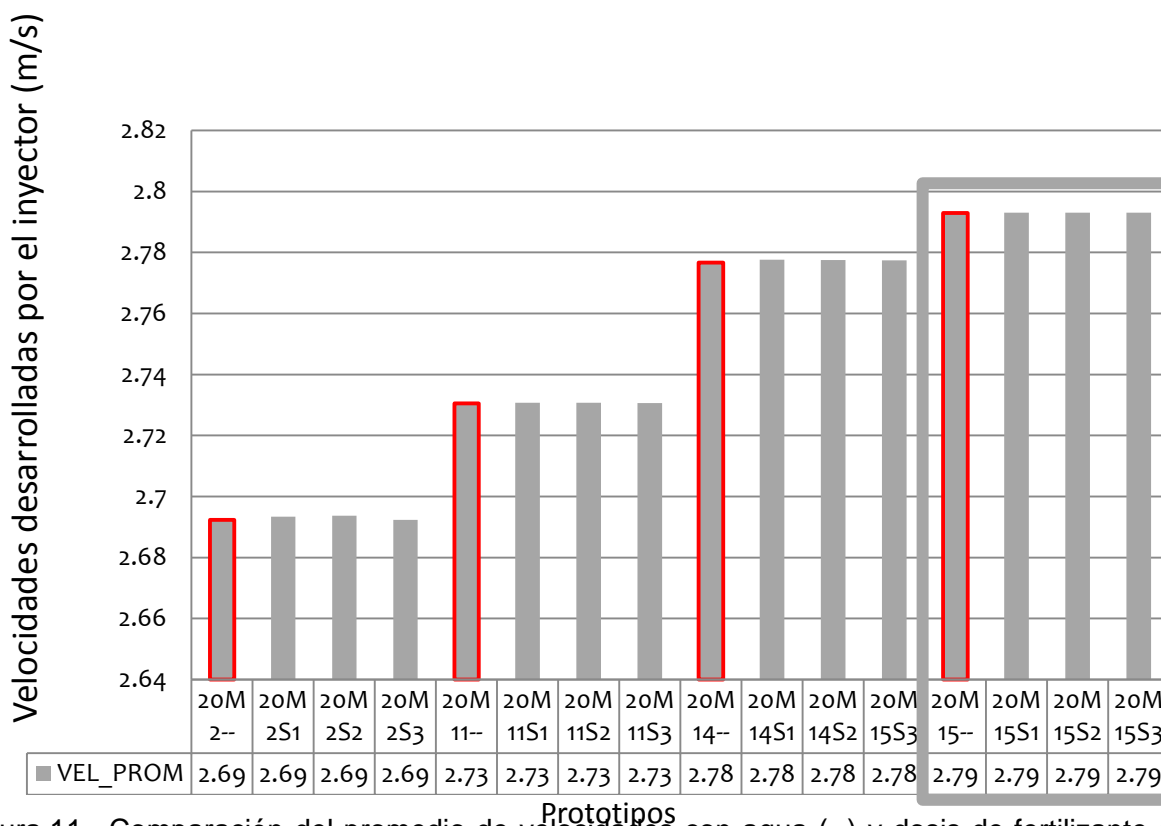


Figura 11. Comparación del promedio de velocidades con agua (--) y dosis de fertilizante (S1, S2 Y S3) a 20 °C. En el marco se indica que la mayor velocidad ocurre en el modelo M15 con cualquier solución.

Posterior a esto se elaboró un análisis de varianzas basado en un arreglo factorial alojado en un diseño experimental completamente al azar. En el ANEXO A se muestra dicho diseño. Los factores evaluados fueron los modelos (M2, M11, M14 y M15), las temperaturas (15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45°C), y las soluciones (Agua, S1, S2 y S3). Se estimó un tamaño de muestras aleatorias de 1000, las cuales equivalen al mismo número de iteraciones en cada simulación para dichas pruebas. Con un IC del 99 % y α de 1 %. El Cuadro 14 muestra los resultados del análisis de varianza.

Cuadro 14. ANOVA con los factores Modelos, Temperatura y Soluciones con IC=99 %, donde se observan diferencias significativas en los factores Modelos y Temperaturas.

Efectos	SS	GL	MS	F	p	Observed power (alpha=0.01)
Intercepto	846.2466	1	846.2466	2.674644E+09	0.000000	1.000000
Modelos	0.1752	3	0.0584	1.845941E+05	0.000000	1.000000
Temperatura	0.0000	6	0.0000	5.308135E+00	0.000088	0.967273
Soluciones	0.0000	3	0.0000	2.999960E+00	0.034216	0.448804
Error	0.0000	99	0.0000			

Al ser la temperatura en la agricultura abierta un factor no controlable, se realizó una prueba de Tukey solamente al factor Modelos para determinar las diferencias entre sus niveles. El Cuadro 15 muestra los resultados finales para la selección del prototipo inyector de fertilizante final.

Cuadro 15. Prueba de Tukey aplicada a los 4 niveles del factor Modelos donde se muestra una diferencia significativa al 1 % entre niveles a favor del modelo M15.

Prueba de Tukey para Modelos		
Modelos	Velocidad ± en el inyector	Grupo
M15	2.792813	a
M14	2.777601	b
M11	2.731309	c
M2	2.692813	d

Estos mismos resultados se pueden observarse gráficamente en la Figura 12. En ésta se muestra el resumen de los resultados obtenidos, donde el modelo M15 sobresale de los demás en cuanto a eficiencia.

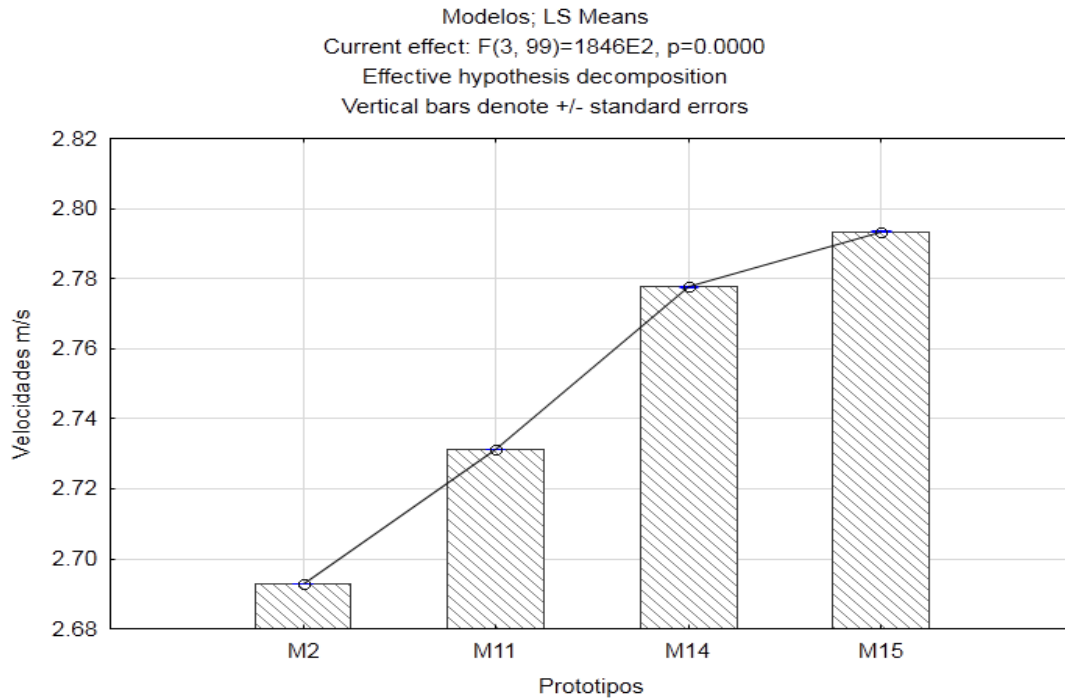


Figura 12. Resultados finales en la selección de los Modelos de prototipos inyectores.

El modelo M15 demostró una mayor velocidad a la salida del inyector (2.7940 m/s) a 35 °C. El modelo M15 se seleccionó para su construcción.

9.5 Construcción

Teniendo seleccionado el modelo del prototipo del inyector de fertilizante M15, se construyó el prototipo a escala real descrito en el capítulo de materiales y métodos.

La evaluación, validación y modificación del diseño se realizará en una fase de investigación de campo posterior a este trabajo.

9.6 Discusión

Algunos autores han señalado que el diseño para el inyector tipo Venturi está probado con un ángulo convergente (θ_c) de 21 y 10.5° (Reader-Harris *et al.*, 2001), y el divergente (θ_d) de 5° y 7° (Zárate,1995). Se confirmó que a un $\theta_c=21^\circ$ estos inyectores tipo Venturi se adaptan también a sistemas de riego de baja presión por

multicompuertas con θ_d de 6° . Sin embargo, el mejor rendimiento de estos bajo las características del experimento se obtuvo con un $\theta_c=7.5^\circ$ y un $\theta_d=10^\circ$.

Los resultados de la selección del prototipo mediante simulaciones coincidieron con lo descrito por Zárate (1995), el cual mencionó que con un θ_c de 7.5° se mejora la eficiencia del inyector contra θ_d de 5° y 7° comerciales. Por tanto, el hecho de diseñar un prototipo inyector de fertilizante tiene mejores resultados que comprarlo.

Una de las ventajas que mencionaron Vargas *et al.* (2008), es que estos tipos de inyectores pueden construirse de manera artesanal con materiales disponibles y de fácil acceso. Es por eso que se emplearon tubos de PVC, resinas y fibra de vidrio.

Otra ventaja es que ya se cuenta con un dispositivo para sistemas de riego por multicompuertas diseñado a la medida para agroecosistemas, cuyas cargas de presión son de 0.7 kg/cm^2 , como es el caso del Proyecto "El Manzano".

Se debe de seleccionar la mezcla adecuada de fertilizante a utilizarse con el inyector, ya que hay variación en cuanto a la respuesta del rendimiento del mismo, influyendo el efecto del cambio de temperatura en las soluciones. Esto concuerda con lo que mencionaron Yuan *et al.* (2000).

Baylar *et al.* (2009) mencionaron que con una mínima diferencia de presión de carga hidráulica en el sistema se genera succión. Los sistemas de riego por multicompuertas, donde se instalará este inyector, existe la diferencia de presión suficiente para asegurar su funcionamiento. Solo queda el inconveniente de la cavitación en el interior del dispositivo al tener una presión del sistema inferior de 2 kg/cm^2 para las pruebas de campo. En caso de que esto afecte al inyector, se tendrá que controlar mediante un regulador de flujo a la entrada del inyector.

10. CONCLUSIONES

En respuesta a la Hipótesis general planteada para la solución del problema de investigación:

Los factores hidráulicos, esto es, ángulos convergente y divergente, diámetros de entrada, salida y garganta, aunados a la carga de presión, influyen en el diseño del inyector. Los ángulos convergentes (θ_c) de 7.5° y 21° funcionan también para inyectores en sistemas de riego por multicompuertas.

De acuerdo con las Hipótesis particulares:

H1: La carga de presión y el gasto del sistema influyen en el diseño de los inyectores de fertilizantes, misma que debe regularse para obtener mejor desempeño en el inyector. Por lo tanto se acepta esta hipótesis.

H2: En la simulación se obtuvo una velocidad constante en el interior del inyector de 2.79 m/s, gracias al diseño y modelado en 3D de los dispositivos, mismos que se probaron con un software de dinámica de fluidos computacional (DFC). Con base en lo anterior, esta hipótesis se acepta en este estudio.

H3: Mediante el método de simulación se seleccionó el prototipo a construir que mejor se adapta a las condiciones de los sistemas de riego de baja presión por multicompuertas. Los resultados referentes al ángulo convergente de 7.5° coincidieron con los descritos por varios autores (Zárate y Vargas entre otros). En las simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), deben tomarse en cuenta todas las propiedades físicas del fluido en cuestión. De esta manera, esta hipótesis se acepta parcialmente.

Existe poca información acerca de dispositivos para aplicación de fertilizantes utilizando el principio del tubo Venturi en sistemas de riego de baja presión por multicompuertas;

por lo que es un gran reto desarrollar un prototipo a la medida que se utilice en estos sistemas de riego. Ninguno de los diseños anteriores se ha utilizado en tales sistemas. En la mayoría de los casos, estos inyectores se utilizan en sistemas de riego por goteo, donde la presión es mayor a la requerida en sistemas de multicompuertas y las dimensiones de los inyectores son muy pequeñas.

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se puede también concluir que se obtuvo una respuesta a la pregunta de investigación, es decir:

Los factores hidráulicos que hacen eficiente un inyector de fertilizante tipo Venturi son: los ángulos convergente y divergente, que son el factor más importante en el diseño. La relación de diámetros β , y el diámetro de garganta (d), proporcionan eficiencia en la inyección. El diámetro del puerto de succión puede controlar la cantidad de fertilizantes absorbidos, si se conecta una válvula reguladora de flujo que restrinja la velocidad de succión y, de esta manera, se puede controlar la homogeneidad de la mezcla a la salida del inyector.

11. LITERATURA CITADA

- Aguilar R., N. 2007. Bioetanol de la caña de azúcar. Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Revista Avances en investigación agropecuaria. ISSN 0188789-0. pp: 25-39.
- Altieri M. A. 2000. Agroecología: Principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables. 1ª. Ed. Ediciones Científicas Americanas. México D.F. Cap. 2. ISBN: 968-7913-04-X.
- Altieri M. A., y C. Nicholls, I. 2007. Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. Revista Ecosistemas 16. pp: 3-12. <http://www.revistaecosistemas.net>
- Guasch P., A. 2002. Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y de servicios. 2da. Ed. Ediciones UPC. Cataluña, España. Cap. 3.
- Baylar A., C. Aydin M., C. Unsal M., C. Ozkan F. 2009. Numerical modeling of Venturi flows for determining air injection rates using fluent V6.2. Mathematical and Computational Applications 14. pp: 97-108.
- Bertalanffy L. V. (1950) "An Outline of General System Theory", The British Journal for the Philosophy of Science, Vol. 1, No. 2 (Aug., 1950). pp: 134-165.
- Bilbao M., J.J. Martínez, A Delgado. 2004. Evaluation of soil nitrate as a predictor of nitrogen requirement for sugar beet grown in a Mediterranean climate. Agronomy Journal 96. pp: 18–25.
- Cadahía L., C. 2005. Fertirrigación cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. 3ª. Ed. Ampliada. Grupo Mundo-Prensa. México. D.F. 681 p.
- Cedillo P., E y M.L. Calzada S. 2010. Los sistemas de riego y las semillas mejoradas en la agricultura moderna. UNAM. Facultad de Estudios Superiores Aragón. Académicos de la Licenciatura en Planificación para el Desarrollo Agropecuario: pp: 3.
- CETRADE (Centro de Estudios para la Transición Democrática), A.C. 2013. El decreto cañero 1999. <http://cetrade.org/v2/revista-transicion/1999/25-ingenios-amarga-realidad/decreto-canero>.
- Civeira G., E. Faure., S. Lavado R., G. Rubio. 2003. Lixiviación de nitratos en suelos destinados a céspedes. Ciencia del Suelo 21(2). pp: 71-73.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2011. Avance del inventario de Unidades de Riego 2011. pp: 93.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) 2012. <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=62&n3=62>

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) 2014.
<http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Normales5110/NORMAL30003.TXT>
- Conway G., R. 1985. Agroecosystems analysis. *Agricultural Administration* 20. pp: 31-55
- Cuanalo De la Cerda, H. y R. Ponce H. 1981. Agrohabitat y agroecosistema. II Seminario de los agroecosistemas de México. Colegio de Postgraduados (Centro de Edafología). pp: 46.
- CVCA (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria). 2010. Monografía de la caña de azúcar. Gobierno del Estado de Veracruz. 21 p.
- Diccionario de la Lengua Española (2014), Vigésimo Segunda Edición.
<http://www.rae.es/RAE/Noticias.nsf/Home?ReadForm>
- Domínguez T., T., A. Aguilar A. 1999. Diagnóstico de la unidad de riego Puente Nacional, Veracruz, México Terra Latinoamericana, vol. 17, núm. 4, octubre-diciembre, 1999, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. pp: 345-354.
- Domínguez V., A. 1993. Fertirrigación. Ed. Mundi Prensa. Madrid España. pp: 227.
- Dupin H., y T. Brunt. 1973. Evolución de la alimentación en los países en vías de desarrollo. Cahiers de Nutrition et de Cientifique. Vol VIII.
- Ecológica, S. E. d. A. 2009. Riego localizado y fertirrigación. Ediciones Mundi-Prensa. enseñanza 1. Programa de cultivos anuales. Turrialba, C.R. pp: 159.
- Fan X., and Kong, L. 2013. Relationship of energy conversion for Venturi injector. Paiguan Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering 31: 6. pp: 528-533.
- FAO. 2007. Estados Unidos. Agua para la alimentación, agua para la vida.
- Galaviz V., I. 2010. Agricultural contamination of subterranean water with nitrates and nitrites: an environmental and public health problem. Journal of agricultural science 2: 2
- García C., L. R., y T. Spreng H. 2001. Estrategias para el cambio en el campo Mexicano. Cap.: La agroindustria azucarera de México: reformas estructurales y sus implicaciones para el mercado de los edulcorantes. 1ª. Ed. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco, México. 2001
- García E., R. Vidal, M. E. Hernández. 1989. Las regiones climáticas de México. En García de Fuentes, A. (ed.). Atlas Nacional de México, Instituto de Geografía, UNAM, vol. 2, cap. IV, núm. 10, Mapa escala 1:12 000 000.

- García R., R. (2006). Sistemas complejos Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. 1ª. Ed. Editorial Gedisa, S.A.Barcelona, España 2006. pp: 21
- Gliessman S., R. 2002. Agroecología. Procesos ecológicos en agricultura sostenible. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.
- Guerrero G., R. e Hilda R., 2012. El agua en México Lecturas de El Trimestre Económico. Ed. Fondo de Cultura Económica, 2012. ISBN 6071611628, 9786071611628.
- Gurovich R., L.A. 1999. Riego Superficial Tecnificado. 2ª Ed., Alfaomega, México.
- Han, Q., X. Huang, H. Liu, W. Wu, Y. Fan. 2013.Comparative analysis on fertilization performance of six Venturi injectors. Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 44: 4. pp: 113-117+136.
- Harper, J.L. 1974. Agricultural agroecosystems. *Agro-Ecosystems* 1. pp: 1-6.
- Hart R., D. 1985. Conceptos básicos sobre agroecosistemas; CATIE. Serie materiales de México.
- Hernández X., E. 1977. El agroecosistema concepto central en el análisis de la enseñanza, la investigación y la educación agrícola en México. In: Hernández X. (Ed.) agroecosistemas de México: contribuciones a la enseñanza, investigación y divulgación agrícola. 2da. ed. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. pp: 9-19.
- Herráez D., J.V. y Delegido G., J. 2010. Elementos de Física Aplicada y Biofísica. España, Universidad de Valencia.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2010. <http://www.inegi.org.mx/>
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2011. Serie autodidacta de medición. Tubos Venturi, Dall y Tobera. Comisión Nacional del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. Dic. 2011. ISBN 968-5536-03-1.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2013. Agua para la producción de alimentos. URL:http://www.imta.gob.mx/index.php?Itemid=106&id=180:agua-para-produccion-de-alimentos&option=com_content&view=article
- Kumara, S., G. Singha K., C. Singla. 2012. A low head, minimum pressure-loss equipment for fertilizer application through drip irrigation. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America* 43: 4. pp: 80-83.
- Landeros S., C. 2003. Proyecto El Manzano. Proyecto ejecutivo para el diseño de dos módulos de riego en caña de azúcar y otros cultivos con redes pequeñas utilizando

tubería de baja presión, en los módulos i-1 la antigua y iii-1 Puente Nacional del Distrito de Riego 035 la antigua del Estado de Veracruz. INFORME FINAL. CONAGUA. COLPOS Campus Veracruz.

Landeros S., C., F. Lango-Reynoso, M. del R. Castañeda-Chávez, I. Galaviz-Villa, I. Nikolskii-Gavrilov, M. Palomarez-García, C. Reyes-Velázquez & M. Magaly Mínguez-Rodríguez. 2012. Assessment of Water Pollution in Different Aquatic Systems: Aquifers, Aquatic Farms on the Jamapa River, and Coastal Lagoons of Mexico. *Journal of Agricultural Science* 4: 7.

Landeros S., C., E. Palacios V., J.M. Hernández P. 2014. El agua y la agricultura en México. *Revista az.* 6: 82. pp: 18-27.

Lewit, E.H. 1952 The Mathematical Equation for Measurement of Flow by Pipe Orifice Hydraulics and Fluid Mechanics. pp: 752.

Ley de Aguas Nacionales. 2012. Artículo 3 fracción XXV.

Li J., M. Yibin, Bei Li, 2006. Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters. *Irrig Sci* (2007) 25. pp: 117–125.

Li, J. , T. Hong, R. Feng, X. Yue, Y. Luo. 2012. Design and experiment of Venturi variable fertilizer apparatus based on pulse width modulation. *Nongye Gongcheng*.

Li, J., T. Hong, R. Feng, H. Ni. 2013. Design and experiment of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer based on fuzzy control. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 29: 16. pp: 22-30.

Lima-Neto, I.E. 2006. Dimensionless formulation of flow in fertilizer injectors [Formulação adimensional do fluxo em injetores de fertilizantes]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 10: 2. pp: 247-251

Lira, A. y Muro, L. 1976. “El siglo de la integración”. Ed. desconocida.

Márquez S., F. 1977. *Sistemas de producción agrícola (Agroecosistemas)*. 1ª. Edición. Departamento de Fitotecnia. Chapingo Edo. De México.

Marten G., G. 1988. Productivity, Stability, Sustainability, Equitability and Autonomy as Properties for Agroecosystem Assessment. *Agricultural System* 26. Honolulu, Hawaii, USA.

Martínez B., L. (2005). *Fertirrigación. Proyecto estudios de validación de tecnologías de riego en el Valle del Huasco*. Comisión nacional de riego. Instituto de investigaciones agropecuarias centro regional de investigación intihuasi. Santiago de Chile.

- Martínez-Dávila, J.P. 2011, *In: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 2011. La Biodiversidad en Veracruz: Estudio de Estado.* Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, A.C. México. Vol 1. pp: 454.
- Martínez D., J.P. 2010. Planificación en los agroecosistemas. Colegio de postgraduados campus Veracruz, en el marco de la XXIII REUNIÓN CIENTÍFICA-TECNOLÓGICA FORESTAL Y AGROPECUARIA VERACRUZ Y II DEL TRÓPICO MEXICANO. México. pp: 55-66.
- Mataix, C, 2005. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas.* Ed. Alfaomega 2da. Edición.
- Mazoyer, M., and Roudart, L. 1997. *Histoire des agricultures du monde.* Le Seuil, Paris, France.
- Mejía S., E.; J. C. Rivera, A. Oviedo, N. Debernardi E., D. V. H., M. Tiscareño, L. 2010. Estudio de Caracterización de Zonas Potenciales de Mecanización en las Zonas de Abasto Cañeras S., Colegio de Postgraduados-SAGARPA, 2010.
- Moreno C., J.C. 2010. Evaluación del Manejo del Nitrógeno en el agroecosistemas caña de azúcar. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Campus Veracruz. 114 p.
- Neto I., E. I., de Melo, P. R. 2004. Performance of low-cost ejectors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* Volume 130, Issue 2, March 2004. pp: 122-128.
- Odum, E.P. 1984. Properties of agroecosystems. *In: Agricultural Ecosystems* (Eds. Lowrance, R.,B.R. Stinner and G.J. House). Ed. John Wiley & Sons. USA. pp: 5-11.
- Orozco R., J. 1998. Producción de Banano Orgánico y/o ambientalmente amigable. Memorias del taller internacional realizado en la EARTH, Guácimo, Costa Rica 27-29 de julio de 1988. pp: 82.
- Palacios V., E. 1998. Por qué?, Cuando?, Cuanto? y Cómo Regar? para Lograr Mejores Cosechas. Manual para Usuarios y Técnicos del Agua. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México. pp: 163.
- Palma-López, D. J., S. Salgado G., J.J. Obrador O., A. Trujillo N., L. del C. Lagunes E., J. Zavala C., A. Ruiz B. y M. A. Carrera M. 2000. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). *Terra* 20. pp: 347-358.
- Parra M., M. Perales, F. Inzunza, C. Solano, E. Hernández, O. Santos. 1984. La regionalización socioeconómica en La Revista de Geografía Agrícola, Nos. 5-6 Julio de 1983 y Enero de 1984. Universidad Autónoma Chapingo (UACH) Chapingo, estado de México.

- Pérez-Vázquez A., 2012. Notas para el curso de Introducción al estudio de los agroecosistemas Tropicales. Campus Veracruz.
- Perumal K., A, Krishnan J. 2013. A CFD study of the effect of Venturi geometry on high pressure wet gas metering. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology* . 6: 5. pp: 549-566.
- Phillips D., C. (1969). Fifth Canberra Seminar in Administrative Studies, Australian National University, May 1969.
- PRONAC (Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar). 2009. Estudio de gran visión para la identificación de necesidades de riego y drenaje en las zonas de abasto cañeras y propuestas de tecnificación en zonas potenciales como base para el desarrollo de proyectos de inversión. SAGARPA, SIAP.
- Reader-Harris, M.J., C. Brunton W., J. Gibson J., D. Hodges, G. Nicholson, I. 2001. Discharge coefficients of Venturi tubes with standard and non-standard convergent angles. *Flow Measurement and Instrumentation* 12: 2. pp: 135-145.
- Regina P., B., P. Richard L., M. Roger, M. Rosendale R., 2003. Fertigation Uniformity Affected by Injector Type. *HortTechnology*. Volume 13, Issue 1, January 2003. pp: 103-105.
- Replogle, J.A., B. Wahlin. 1994. Venturi meter constructions for plastic irrigation pipelines. *Applied Engineering in Agriculture*. 10: 1. pp: 21-26.
- Shannon E., R. 1988. Introduction to the art and science of simulation. Winter Simulation Conference.
- Ruiz-Rosado O. 1995. Agroecosistema: el término, concepto y su definición bajo el enfoque agroecológico y sistémico. *In: Loera, et al., (eds). Agroecología y Desarrollo Sustentable. Segundo Seminario Internacional de Agroecología. Chapingo. Mex. 29-31 marzo. pp: 103-113.*
- Ruiz-Rosado, O. 2006. Agroecología: una disciplina que tiende a la transdisciplina. *Interciencia ISSN 0378-1844: Revista de ciencia y tecnología de América*, 31: 2. pp: 140-145.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2008. Estudio de gran visión para la identificación de necesidades de riego y drenaje en las zonas de abasto cañeras y propuestas de tecnificación en zonas potenciales como base para el desarrollo de proyectos de inversión. Etapa I. pp: 8.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2010. Escenario base 09-08. Proyecciones para el Sector Agropecuario de México. pp: 39.

- S.E. (Secretaría de Economía). 2012. Memoria documental “Mercado del Azúcar” 2006-2012. 36 p.
- Secretaría de Economía. 2012. Análisis de la situación económica, tecnológica y de política comercial del sector edulcorantes en México.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2009. El medio ambiente en México 2009: en resumen. 53 p.
- SEPAGUA (Sistemas y Equipo para Abastecimiento de Agua). 2013. Riego por multicompuertas. <http://www.sepagua.com.mx>
- Sevilla G., E. 2007. De la sociedad a la agroecología. Perspectivas agroecológicas. Vol 1. Icaria Editorial, España. pp: 75-103.
- SNIA (Sistema Nacional de Indicadores Ambientales). 2013. Anuario Conjunto de Bases de datos. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN).
- Sun, Y., W. Niu, 2012. Simulating the effects of structural parameters on the hydraulic performances of Venturi tube. Modelling and Simulation in Engineering. Volume 2012, 2012, Article number 458368. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A and F University, Yangling, Shaanxi 712100, China.
- Trebuil G., Kam P., S. 2000. From cropping and farming System Research to Ecoregional Approaches for Integrated Natural Resources Management: Developing the Agricultural System Concept. Proceedings of the First Thailand National Agricultural Seminar. Bangkok. pp: 257-276.
- Trujillo M., J. 2011. Impacto ambiental de la actividad azucarera y estrategias de mitigación. Tesis. Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas. 72 p.
- Vargas M., R., R. Chipana, E. Huaita C. 2008. Inyector de fertilizante tipo Venturi: construcción y evaluación. Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia.
- VICAMP. 2002. Inyector de Fertilizantes VICAMP 9. Manual de Instalación y operación: pp. 1 – 2.
- Waterfootprint. 2010. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. URL: <http://www.waterfootprint.org/?page=files/productgallery>
- Yan, H., X. Chu, M. Wang, Z. Ma. 2010. Injection performance of Venturi injector in micro-irrigation system. Paiguan Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering 28: 3. pp: 251-255+264. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China.

- Yan, H., X. Chu. 2011. Numerical simulation for influence of throat diameter on Venturi injector performance. Paiguan Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering 29: 4. pp: 359-363.
- Yan H., J, Y. Chen, Y. Chu X., C. Xu, Y. and P. Wang, Z. 2012. Effect of structural optimization on performance of Venturi injector. 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems IOP Publishing. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 15 (2012) 072014doi:10.1088/1755-1315/15/7/072014.
- Yan, H., Y. Chen, X. Chu, Y. Xu , Z. Wang. 2013 a. Influence of optimization of structural parameters on injection performance of Venturi injector. Paiguan Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering 31: 2. pp: 162-166+179.
- Yan, H., Y. Chen, Y. Xu, Z. Wang. 2013 b. Experimental investigation on cavitation characteristics of Venturi injector. Paiguan Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering 31: 8. pp: 724-728.
- Yuan, Z., Y. Choi C., M. Waller P., P. Colaizzi. 2000. Effects of liquid temperature and viscosity on Venturi injectors. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 43: 6. pp: 1441-1447. University of Arizona, Dept. Agricultural/Biosystems Eng., Shantz Bldg. No. 38, Tucson, AZ 85721, United States.
- Zarate R., N. 1995. *Desenvolvimento e Avaliação de dos Injetores de Fertilizantes tipo Venturi*. Piracicaba, Sao Paulo – BR. Mestrado em Agronomia Área de concentração Irrigação e Drenagem da Escola Superior Luiz Queiroz USP. pp: 67.

ANEXO A. Figuras y Cuadros complementarios



ETAPAS:

- 1 > Diagnóstico y estado del Sistema de Riego por Multicompuertas.
- 2 > Diseño del Prototipo.
- 3 > Simulación.
- 4 > Análisis de datos.
- 5 > Conclusiones estadísticas
- 6 > Construcción

Figura A-1. Etapas para el trabajo de investigación descritas en materiales y métodos.

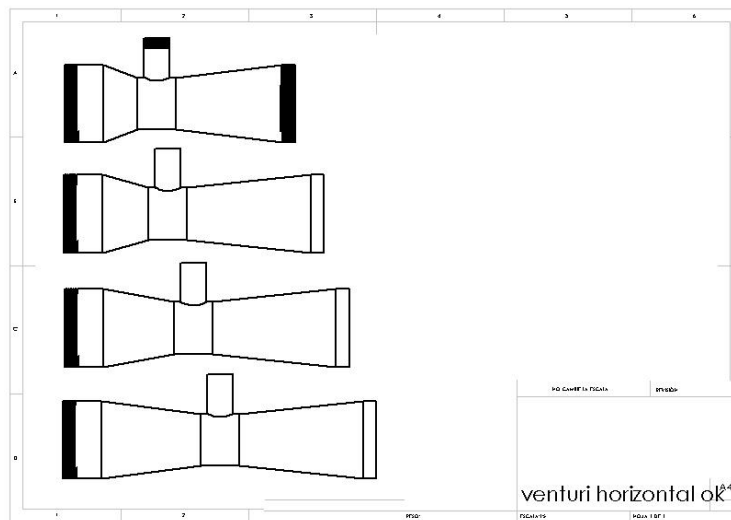


Figura A-2. Modelos de inyectores desarrollados con el software *SolidWorks* 2014®

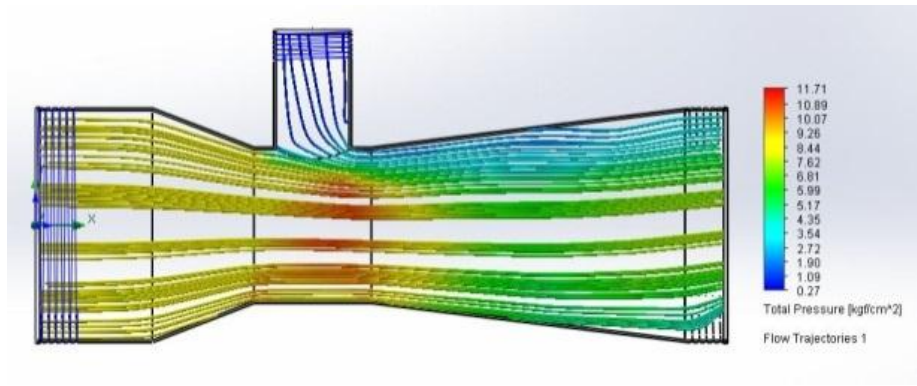


Figura A-3. Simulación donde se observan las diferencias de presión hidráulica dentro del inyector modelado en 3D.



Figura A-4. Vista de sección de un prototipo inyector de fertilizante.

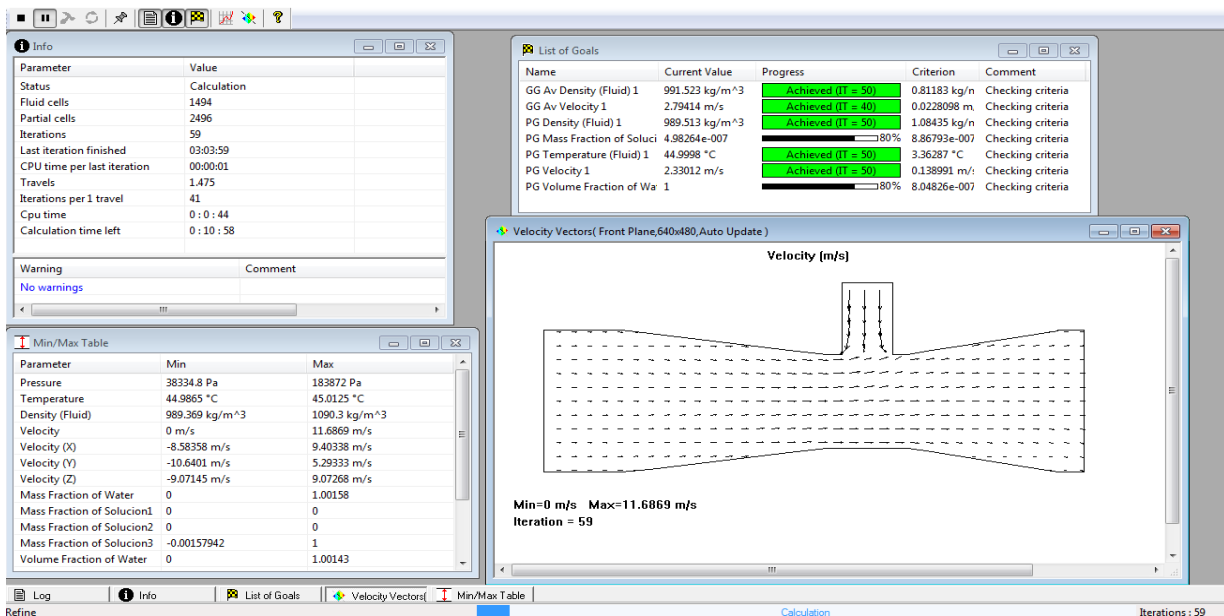


Figura A-5. Ventana de Simulación por CDF.

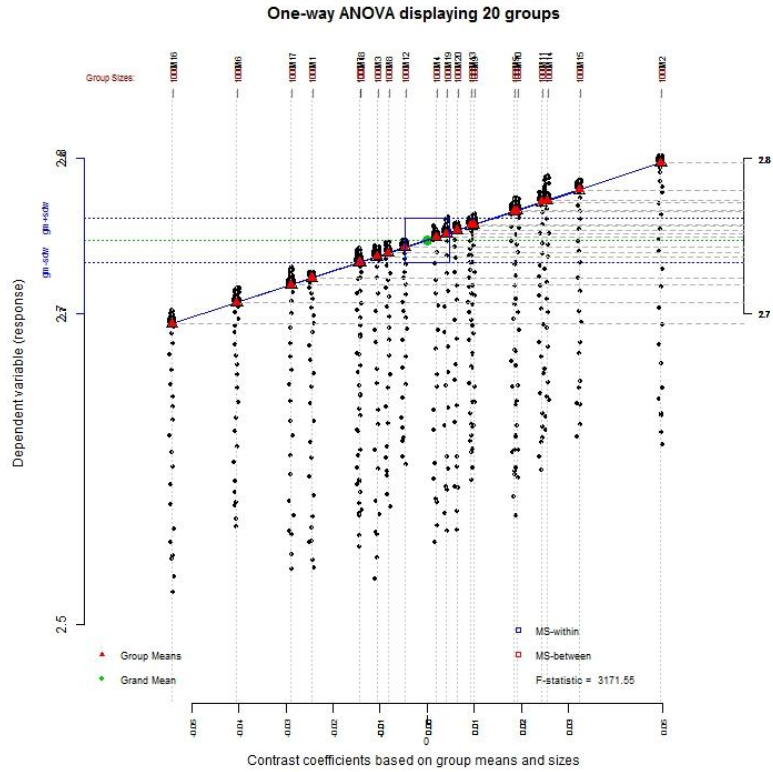


Figura A-6. Gráfica de comparación de ANOVA con los 20 modelos iniciales.

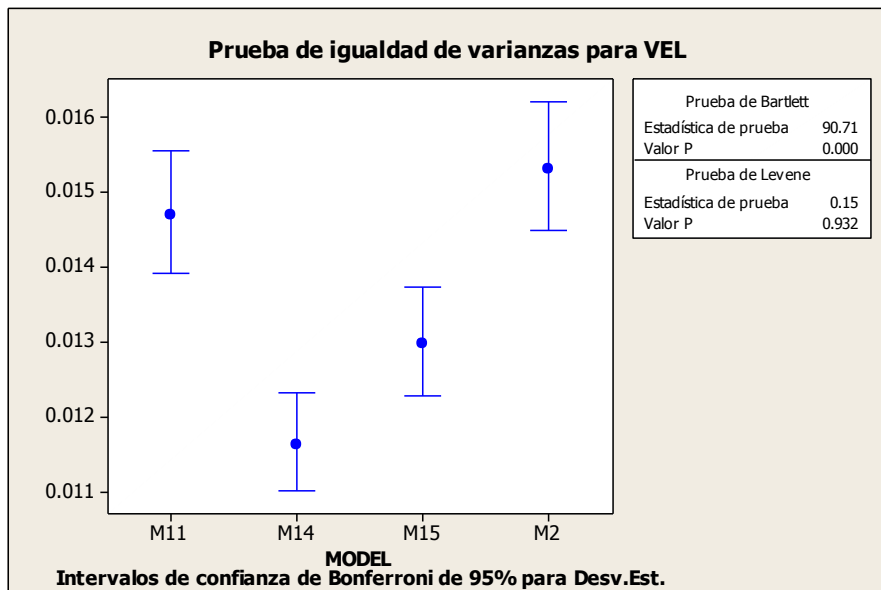


Figura A-7. Gráfica de comparación de los cuatro modelos finales con un IC de 95 %.

venturi horizontal SIMULACION M15.SLDPRT [Project M15 [M15]]

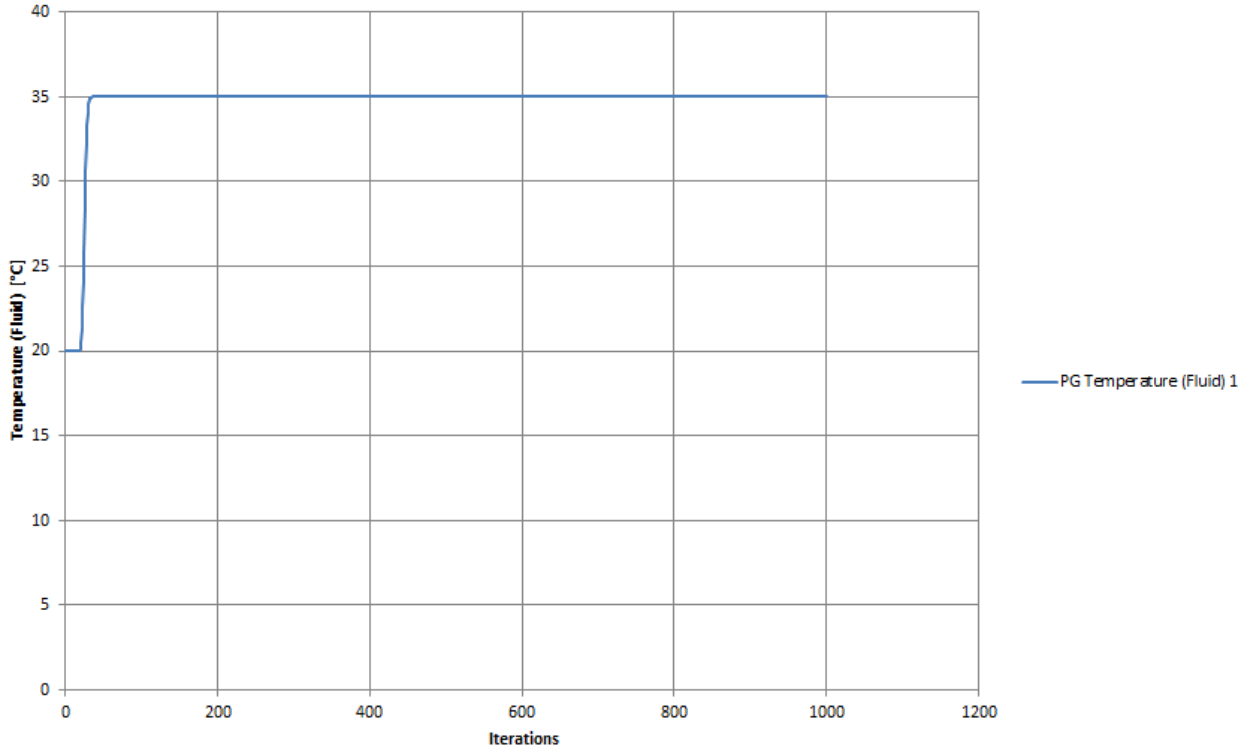


Figura A-8. Gráfica de comportamiento de la temperatura en el modelo M15.

venturi horizontal SIMULACION M15.SLDPRT [Project M15 [M15]]

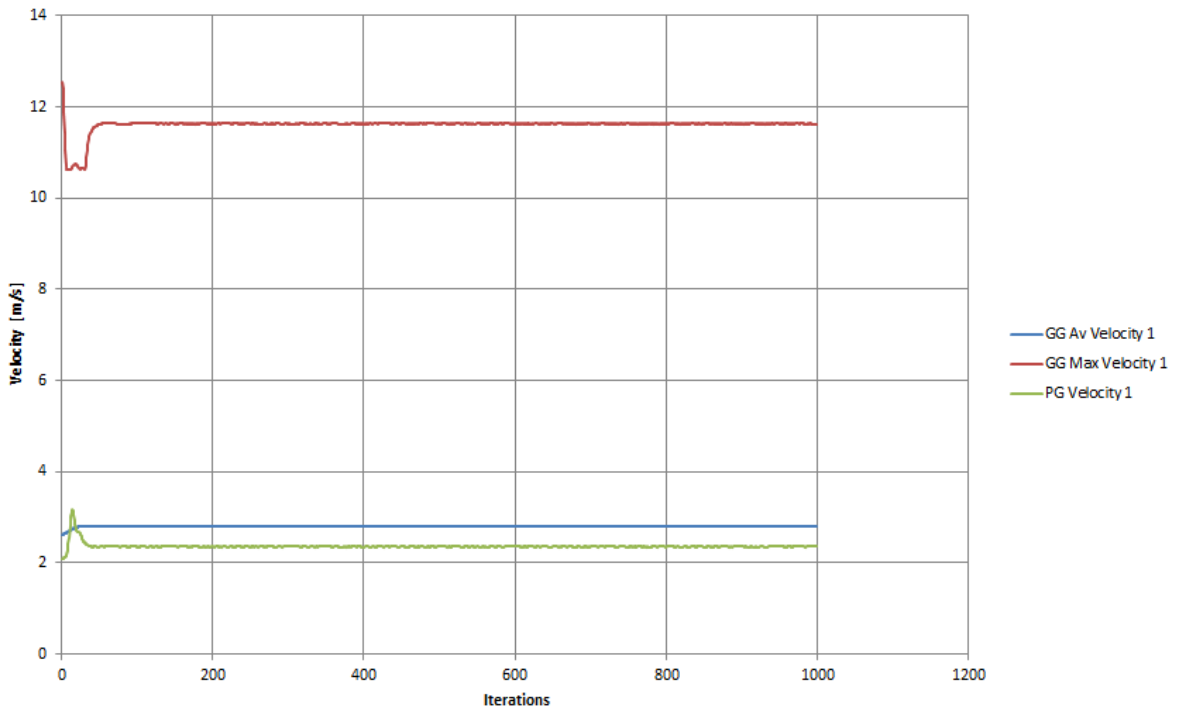


Figura A-9. Gráfica de comportamiento de la velocidad en el modelo M15.

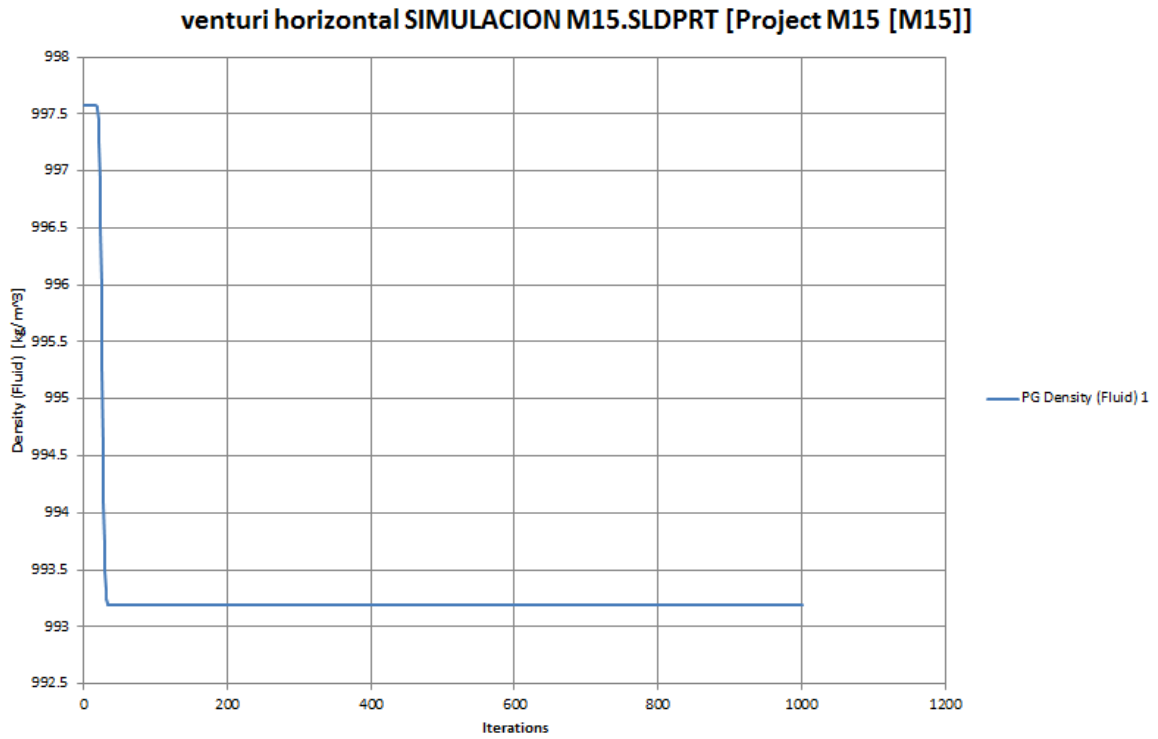


Figura A-10. Gráfica de comportamiento de la densidad en el modelo M15.

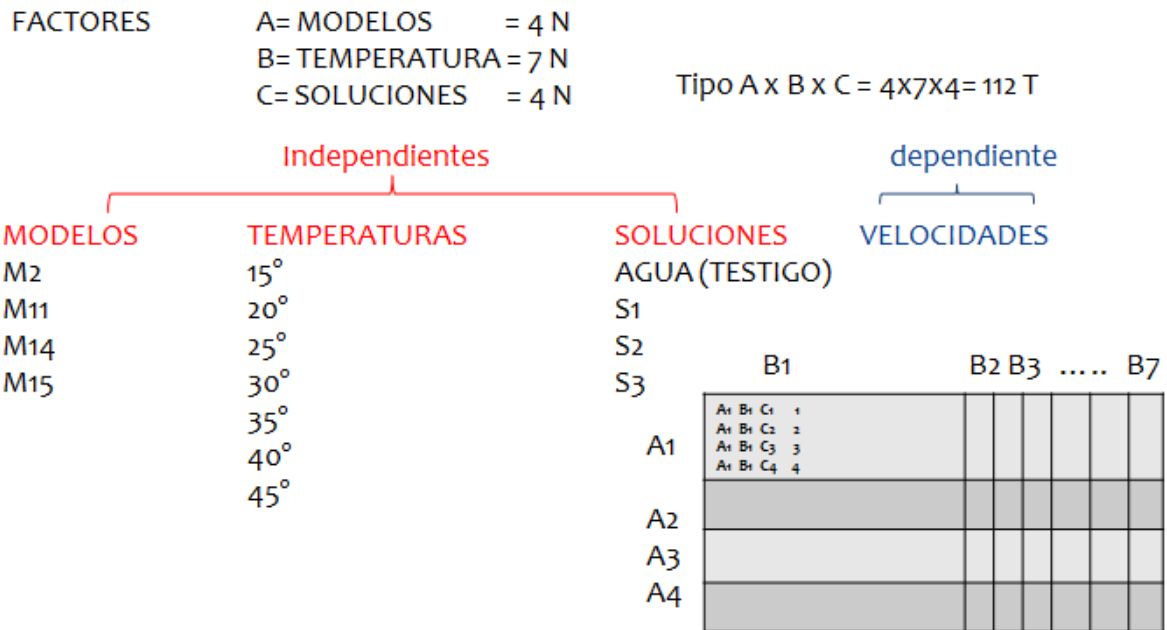


Figura A-11. Diseño experimental para los cuatro inyectores finales.

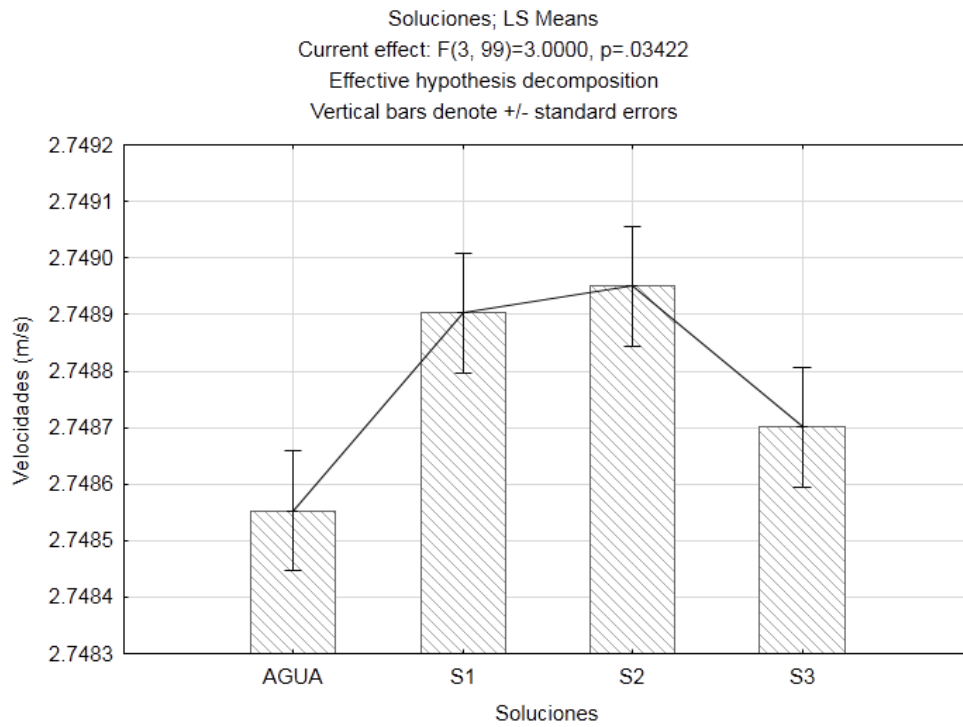


Figura A-12. Efecto en las soluciones utilizadas en el simulador, Donde se observa que la solución S2 sobresale del resto y es igual estadísticamente que S1.

DATOS HISTÓRICOS												
MES	TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA (°C)			TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA (°C)	TEMPERATURA MÍNIMA EXTREMA (°C)			TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA (°C)	LLUVIA MÁXIMA EN 24 H (mm)			LLUVIA MEDIA (mm)
	DATO	DÍA	AÑO	DATO	DATO	DÍA	AÑO	DATO	DATO	DÍA	AÑO	DATO
ENERO	36.5	22	1999	27.3	7.2	30	1973	14.9	40.1	22	1994	13.1
FEBRERO	38.7	21	1971	28.6	6.0	14	1960	15.5	44.3	20	1990	10.5
MARZO	41.7	4	1983	30.6	7.0	6	1987	17.0	23.8	2	1995	11.0
ABRIL	43.5	16	1998	33.0	10.0	1	1987	19.2	61.3	30	1955	15.6
MAYO	44.0	8	1998	34.3	13.4	27	1970	21.1	61.8	16	1996	34.1
JUNIO	43.0	5	1998	33.9	15.1	5	1970	21.5	183.4	20	1973	142.6
JULIO	39.1	17	1967	32.8	16.5	21	1956	20.6	169.7	30	1961	207.5
AGOSTO	38.0	3	2007	33.1	16.0	17	2000	20.6	189.2	5	1979	154.8
SEPTIEMBRE	38.5	8	2003	32.7	14.0	30	1979	20.6	180.3	20	1974	146.1
OCTUBRE	37.0	17	2006	31.7	10.5	20	1957	19.3	124.3	20	1995	67.8
NOVIEMBRE	39.5	2	1991	29.9	8.0	30	2011	17.5	101.0	11	1986	33.1
DICIEMBRE	39.1	21	1957	28.0	5.0	24	1989	15.8	28.9	23	1962	10.7

Estación: Actopan
 Latitud: (19.50 °N) Longitud (96.61° W) Altitud (250 m)
 Municipio: Actopan, Ver.
 Cuenca: Actopan
 Clave Clicom: 30003
 Clave SIH: ACTVC Normal Climatológica 1982-2011

CONAGUA
 COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SEMARNAT
 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

**NOTA DE CAUTELA: EL USO DE ESTA INFORMACIÓN SERÁ RESPONSABILIDAD EXCLUSIVA DEL USUARIO
 LA UTILIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN CON FINES LEGALES DEBE SOLICITARSE POR ESCRITO AL ÁREA RESPONSABLE**

Cuadro A-1. Registro histórico de temperaturas 1982-2011, en estación Actopan.

venturi horizontal SIMULACION M15.SLDPRT [Project M15 [M15]]

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress %	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Velocity 1	[m/s]	2.794494678	2.794284361	2.793739698	2.794934617	100	Yes	0.000162413	0.022189839
GG Max Velocity 1	[m/s]	11.62745443	11.6289015	11.62646593	11.6419023	100	Yes	0.001761168	0.164070487
PG Velocity 1	[m/s]	2.352237398	2.357132175	2.346584371	2.363519391	100	Yes	0.002636414	0.138947325
PG Temperature (Fluid) 1	[°C]	34.99981911	34.99981618	34.99981254	34.9998222	100	Yes	1.48429E-06	2.017769787
PG Density (Fluid) 1	[kg/m^3]	993.186336	993.186337	993.1863349	993.1863383	100	Yes	5.09195E-07	0.590283545

Iterations: 1000

Analysis interval: 21

Cuadro A-2. Resumen de una simulación utilizando el modelo M15, donde se observan los parámetro medidos por mediante la simulación.

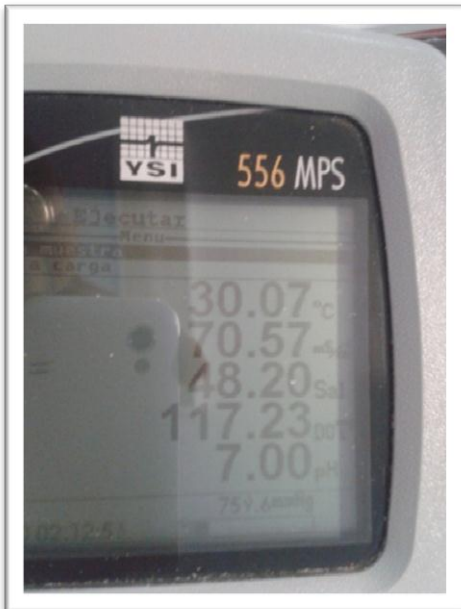
ANEXO B. Memoria fotográfica



ANEXO B-1. Sistemas de riego de baja presión por multicompuertas.



ANEXO B-2. Experimento para determinar densidad, viscosidad y temperatura en las soluciones de agua-fertilizante empleadas en las simulaciones.



ANEXO B-2 (continuación). Experimento para determinar densidad, viscosidad y temperatura en las soluciones de agua-fertilizante empleadas en las simulaciones.