



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Especialidad en Ingeniería de Invernaderos

“COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE
VERDE EN DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO.”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de la
Especialidad en Ingeniería de Invernaderos

Presenta:
Anna Paola Putzu Torres

Dirigido por:
Genaro Martín Soto Zarazúa

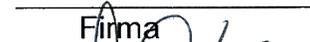
SINODALES

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa
Presidente



Firma

M. en C. Juan Fernando García Trejo
Secretario



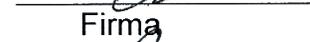
Firma

Dra. Rosalía Virginia Ocampo Velázquez
Vocal



Firma

M. en C. Oscar Alatorre Jacome
Suplente

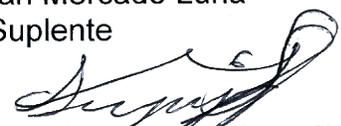


Firma

M. en C. Adán Mercado Luna
Suplente



Firma



Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre 2012
México

RESUMEN

La producción de forraje verde hidropónico (FVH) constituye una opción alternativa a los métodos convencionales de producción de forraje que contribuye a una actividad agropecuaria sostenible, sobre todo en las zonas áridas y semiáridas. En este estudio se propone la acuaponía como una alternativa para el cultivo de forraje verde como un subproducto a partir del agua de desecho de un cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*). El experimento consistió en un diseño factorial en el que se prueban cuatro riegos: control (agua corriente), hidropónico, acuapónico y mixto (acuapónico suplementado con hidropónico), con tres especies forrajeras: alfalfa (*Medicago sativa*), cebada (*Hordeum vulgare*) y maíz (*Zea mays*), para la evaluación de su rendimiento en cuanto a peso húmedo, altura, porcentaje de humedad, peso seco, porcentaje de materia seca y productividad en términos de materia seca por unidad de área (m²) por año. Se encontró que las diferencias entre especies fueron significativas para todas las variables evaluadas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p < 0.05$, $\alpha = 0.05$). En cuanto al análisis estadístico entre los riegos, no hubo diferencias significativas en ninguno de los parámetros, a excepción de la altura del maíz en la primera corrida del experimento, que tuvo mayores valores para el riego hidropónico. En la segunda corrida solamente los resultados de peso húmedo en maíz tuvieron diferencias significativas entre riegos, no obstante, dichos resultados no afectaron su comportamiento en cuanto a peso seco, considerando al maíz como la especie más productiva y los riegos acuapónico y mixto como los más sobresalientes entre los diferentes sistemas de cultivo.

(Palabras clave: Forraje Verde Hidropónico (FVH), acuaponía)

SUMMARY

The hydroponic green fodder production (HGF) is an alternative to conventional methods of forage production that contributes to sustainable farming, especially in arid and semi-arid lands. This study proposes an alternative aquaponics for growing green fodder as a byproduct from wastewater of a tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture. The experiment consisted of a factorial design in which four production systems are tested: control (water), hydroponic, aquaponic and “mixed” (supplemented aquaponic with hydroponic), with three forages: alfalfa (*Medicago sativa*), barley (*Hordeum vulgare*) and corn (*Zea mays*), to evaluate its performance in height, wet weight, moisture percentage, dry weight, dry matter percentage and productivity in terms of dry matter per unit area (m²) per year. Differences were significant for all variables tested in the statistical analysis for species, according to the Tukey test ($p < 0.05$; $\alpha = 0.05$). They were not significant differences for the statistical analysis, in any of the parameters evaluated between systems, except for the height of corn, in the first cycle of the experiment, which had higher values on the hydroponic system. In the second cycle of the experiment, only the results of the Tukey test of corn wet weight were significantly different between production systems, however, these results did not affect its behavior in terms of dry weight considering maize as the most productive species; and aquaponic and “mixed” as the most outstanding among the different cropping systems .

(Key words: hydroponic green fodder production (HGF), aquaponics).

DEDICATORIAS

A mis padres Ana y Pietro que con tanto esfuerzo y dedicación me criaron y guiaron en el camino que he decidido tomar.

A mis hermanos Giovanni y Anna Lucia por su apoyo.

A mi familia, que siempre ha creído en mí, en especial a mis abuelitas Esperanza y Anna que han sido un gran ejemplo de vida.

A la ciencia, para que el nuevo conocimiento se aplique con conciencia y libertad, en beneficio de nuestra Madre Tierra.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la vida por las oportunidades que día a día me ofrece.

A la divinidad y a la conciencia por ser la luz que me ha guiado en el camino y que a pesar de los tropiezos no me dejan sola.

A los maestros y maestras con título y sin él, que me han compartido su conocimiento generosamente. Gracias a ellos y ellas es posible este trabajo.

A la gente del campus Amazcala trabajadores, compañeros, amigos que de alguna u otra forma apoyaron en la realización de este trabajo.

Al CONACYT por el apoyo económico.

ÍNDICE

Resumen	2
Summary	3
Dedicatorias	4
Agradecimientos	5
Índice	6
Índice de Cuadros	10
Índice de Figuras	12
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. REVISION DE LITERATURA	18
2.1. Forraje verde hidropónico (FVH)	18
2.2. Acuaponía.....	20
2.2.1. Sistemas acuapónicos.	21
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	23
3.1. Objetivo general.....	23
3.2. Objetivos Particulares.....	23
3.3. Hipótesis.	23
4. METODOLOGÍA	24
4.1. Diseño experimental.....	24
4.2. Descripción del sitio.....	25
4.3. Caracterización del agua del efluente del cultivo acuícola.....	25
4.4. Sistemas de producción de FVH.	28
4.4.1. Monitoreo de variables ambientales.	28
4.4.2. Selección del material vegetal.	29
4.4.3. Pruebas de germinación.	29
4.4.4. Cantidad de semilla.....	30
4.4.5. Desinfección del invernadero y material a utilizar.....	31
4.4.6. Preparación de la semilla.....	31
4.4.7. Siembra.....	31
4.4.8. Germinación.....	32

4.4.9. Riego.....	32
4.4.10. Evaluación de rendimiento.....	35
4.5. Análisis estadístico.....	36
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
5.1. Caracterización del agua del efluente del cultivo acuícola.....	37
5.2. Sistemas de producción de FVH.....	37
5.2.1. Monitoreo de variables ambientales.....	37
5.2.1.1. Temperatura.....	37
5.2.1.1.1. Primera corrida.....	37
5.2.1.1.2. Segunda corrida.....	39
5.2.1.2. Humedad Relativa.....	41
5.2.1.2.1. Primera corrida.....	41
5.2.1.2.2. Segunda corrida.....	42
5.2.1.3. Radiación.....	44
5.2.1.3.1. Primera corrida.....	44
5.2.1.3.2. Segunda corrida.....	45
5.2.2. Pruebas de germinación.....	45
5.2.3. Cantidad de semilla.....	46
5.2.4. Evaluación del rendimiento.....	46
5.2.4.1. Análisis comparativo entre las especies evaluadas.....	46
5.2.4.1.1. Primera corrida.....	46
5.2.4.1.1.1. Altura.....	47
5.2.4.1.1.2. Peso húmedo.....	48
5.2.4.1.1.3. Porcentaje de humedad.....	48
5.2.4.1.1.4. Peso seco.....	49
5.2.4.1.1.5. Porcentaje de materia seca.....	50
5.2.4.1.1.6. Índices de productividad.....	50
5.2.4.1.2. Segunda corrida.....	51
5.2.4.1.2.1. Altura.....	52
5.2.4.1.2.2. Peso húmedo.....	53
5.2.4.1.2.3. Porcentaje de humedad.....	53
5.2.4.1.2.4. Peso seco.....	54
5.2.4.1.2.5. Porcentaje de materia seca.....	55
5.2.4.1.2.6. Índices de productividad.....	55
5.2.4.2. Análisis comparativo por especie entre riegos.....	57
5.2.4.2.1. Primera corrida.....	57
5.2.4.2.1.1. Maíz.....	57
5.2.4.2.1.1.1. Altura.....	57

5.2.4.2.1.1.2. Peso húmedo.....	58
5.2.4.2.1.1.3. Porcentaje de humedad.....	58
5.2.4.2.1.1.4. Peso seco.	58
5.2.4.2.1.1.5. Porcentaje de materia seca.....	58
5.2.4.2.1.1.6. Índices de productividad.....	59
5.2.4.2.1.2. Cebada.	59
5.2.4.2.1.2.1. Altura.....	60
5.2.4.2.1.2.2. Peso húmedo.....	60
5.2.4.2.1.2.3. Porcentaje de humedad.....	60
5.2.4.2.1.2.4. Peso seco.	60
5.2.4.2.1.2.5. Porcentaje de materia seca.....	60
5.2.4.2.1.2.6. Índices de productividad.....	61
5.2.4.2.1.3. Alfalfa.	61
5.2.4.2.1.3.1. Altura.....	62
5.2.4.2.1.3.2. Peso húmedo.....	62
5.2.4.2.1.3.3. Porcentaje de humedad.....	62
5.2.4.2.1.3.4. Peso seco.	62
5.2.4.2.1.3.5. Porcentaje de materia seca.....	62
5.2.4.2.1.3.6. Índices de productividad.....	63
5.2.4.2.2. Segunda corrida.....	63
5.2.4.2.2.1. Maíz.	63
5.2.4.2.2.1.1. Altura.....	64
5.2.4.2.2.1.2. Peso húmedo.....	64
5.2.4.2.2.1.3. Porcentaje de humedad.....	64
5.2.4.2.2.1.4. Peso seco.	65
5.2.4.2.2.1.5. Porcentaje de materia seca.....	65
5.2.4.2.2.1.6. Índices de productividad.....	65
5.2.4.2.2.2. Cebada.	65
5.2.4.2.2.2.1. Altura.....	66
5.2.4.2.2.2.2. Peso húmedo.....	66
5.2.4.2.2.2.3. Porcentaje de humedad.....	66
5.2.4.2.2.2.4. Peso seco.	66
5.2.4.2.2.2.5. Porcentaje de materia seca.....	67
5.2.4.2.2.2.6. Índices de productividad.....	67
5.2.4.2.2.3. Alfalfa.	67
5.2.4.2.2.3.1. Altura.....	68
5.2.4.2.2.3.2. Peso húmedo.....	68
5.2.4.2.2.3.3. Porcentaje de humedad.....	68

5.2.4.2.2.3.4. Peso seco.....	68
5.2.4.2.2.3.5. Porcentaje de materia seca.....	68
5.2.4.2.2.3.6. Índices de productividad.....	68
5.2.5. Costos de producción.....	71
5.2.5.1. Sistema hidropónico.....	71
5.2.5.2. Sistema mixto.....	72
5.2.5.3. Sistema acuapónico.....	73
5.2.5.4. Sistema control.....	73
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
7. ANEXOS	78
8. LITERATURA CITADA.....	85

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
2.1. DEMANDA HÍDRICA DE DIFERENTES ESPECIES FORRAJERAS (FAO, 2001).....	19
4.1. ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL EXPERIMENTO.	24
4.2. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA DE RIEGO PARA EL SISTEMA CONTROL.....	33
4.3. FÓRMULA MODIFICADA POR ÁLVAREZ (2009) A PARTIR DEL MANUAL TÉCNICO DE FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO PROPUESTO POR LA FAO (2001) PARA PREPARAR 200 L DE SOLUCIÓN HIDROPÓNICA PARA LA PRODUCCIÓN DE FVH.	33
4.4. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA DE RIEGO PARA EL SISTEMA ACUAPÓNICO.	34
4.5. CANTIDADES DE FERTILIZANTE EMPLEADAS PARA PREPARAR 200 L DE SOLUCIÓN DE RIEGO PARA EL SISTEMA “MIXTO” PARA LA PRODUCCIÓN DE FVH.	34
4.6. CUADRO COMPARATIVO DEL BALANCE IÓNICO Y PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE LOS RIEGOS DE LOS DIFERENTES SISTEMAS EVALUADOS.....	35
5.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE AGUA PARA LOS RIEGOS ACUAPÓNICO Y MIXTO.....	37
5.2. PORCENTAJE DE GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS UTILIZADAS EN EL EXPERIMENTO.....	46
5.3. CANTIDAD DE SEMILLA UTILIZADA PARA CADA ESPECIE POR CHAROLA.	46
5.4. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA EVALUADAS ENTRE LAS DIFERENTES ESPECIES UTILIZADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE DURANTE LA PRIMERA CORRIDA. LOS SUPERÍNDICES INDICAN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS GRUPOS CON UN VALOR P <0.05 DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY ($\alpha=0.05$).	47
5.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA EVALUADAS EN LAS DIFERENTES ESPECIES INVOLUCRADAS EN EL EXPERIMENTO DURANTE LA CORRIDA #2. DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY ($\alpha=0.05$) LOS RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN ENTRE GRUPOS CON UN VALOR P <0.05 INDICAN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS.....	52
5.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN MAÍZ ENTRE LAS DIFERENTES VARIABLES DE RESPUESTA PARA LOS SISTEMAS DE RIEGO EVALUADOS EN LA PRIMERA CORRIDA. LOS SUPERÍNDICES INDICAN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS GRUPOS CON UN VALOR P <0.05 DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY ($\alpha=0.05$).	57
5.7. DATOS ESTADÍSTICOS REPRESENTATIVOS PARA LA CEBADA, DERIVADOS DEL ANÁLISIS ENTRE LOS DIFERENTES RIEGOS Y LOS PARÁMETROS EVALUADOS DURANTE LA PRIMERA CORRIDA DEL EXPERIMENTO.....	59
5.8. ESTADÍSTICOS PROCEDENTES DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS EN ALFALFA EN LOS DIFERENTES RIEGOS DURANTE LA PRIMERA CORRIDA DEL EXPERIMENTO.	61
5.9. ESTADÍSTICOS CALCULADOS PARA LAS VARIABLES DE RESPUESTA EVALUADAS A PARTIR DE LOS DATOS REGISTRADOS PARA MAÍZ DE LA SEGUNDA CORRIDA EN RELACIÓN CON LOS RIEGOS. LAS DIFERENCIAS	

SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS GRUPOS DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY ($\alpha=0.05$) CON UN VALOR RESULTANTE DE $P < 0.05$ SE REPRESENTAN CON SUPERÍNDICES.	63
5.10. VARIABLES EVALUADAS DURANTE LA CORRIDA #2 DEL EXPERIMENTO EN CEBADA CONTRA LOS DIFERENTES RIEGOS.....	66
5.11. ESTADÍSTICOS CALCULADOS EN LAS MUESTRAS DE ALFALFA PARA LAS DIFERENTES VARIABLES DE RESPUESTA EN LOS CUATRO SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EVALUADOS DURANTE LA SEGUNDA CORRIDA DEL EXPERIMENTO.	67
5.12. COMPARACIÓN DE PRODUCTIVIDAD PROMEDIO Y CANTIDAD DE SEMILLA CALCULADAS EN DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN. ¹ (URBANO D, 2003); ² (CARR PM, 1998); ³ (LAUER JG, 2001).	70
5.13. TABLA COMPARATIVA DEL USO EFICIENTE DEL AGUA (UEA) EN DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN. ⁴ (JEFFERSON PG, 2005); ⁵ (AZOOZ RH, 1998); ⁶ (HOWELL TA, 1998).....	71
5.14. COSTOS DE PRODUCCIÓN DE FVH PARA EL SISTEMA CON RIEGO HIDROPÓNICO.	72
5.15. COSTOS DE PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE PARA EL SISTEMA MIXTO.	72
5.16. COSTOS DE PRODUCCIÓN DE FVH PARA EL SISTEMA ACUAPÓNICO.	73
5.17. COSTOS DE PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE EN EL SISTEMA CONTROL.	73
5.18. PRECIOS UNITARIOS POR KILO DE FORRAJE VERDE DE CEBADA PRODUCIDO DE ACUERDO A VARIOS AUTORES.	75
7.1. DESGLOSE DE LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS.	79
7.2. INSUMOS UTILIZADOS EN EL SISTEMA HIDROPÓNICO.	80
7.3. INSUMOS OCUPADOS PARA PRODUCIR FVH EN EL SISTEMA MIXTO.	81
7.4. INSUMOS QUE SE UTILIZARON PARA EL SISTEMA ACUAPÓNICO.	82
7.5. INSUMOS USADOS PARA LA PRODUCCIÓN EN EL SISTEMA CONTROL.....	83
7.6. RESULTADOS DE PRODUCTIVIDAD EN PESO FRESCO (G) POR CHAROLA, CONSIDERADOS PARA LOS CÁLCULOS DE PRECIO UNITARIO EN LOS DIFERENTES SISTEMAS.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1. PROTOTIPO DE PRODUCCIÓN EN ACUAPONÍA DEL INSTITUTO NUEVA ALQUIMIA (BARNHART, 2006). .. 21	
2.2. ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL MODELO DE RECIRCULACIÓN PROPUESTO POR LEWIS Y COLABORADORES DESDE 1976 (LEWIS ET AL., 1978)..... 22	
2.3. ESQUEMA DEL SISTEMA ACUAPÓNICO MEJORADO POR SUTTON Y LEWIS EN 1982. 22	
4.1. UBICACIÓN DEL INVERNADERO DE FVH EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA UAQ, CAMPUS AMAZCALA. 25	
4.2. UBICACIÓN DEL INVERNADERO DE PRODUCCIÓN DE TILAPIA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UAQ CAMPUS AMAZCALA. 26	
4.3. ESTRUCTURAS METÁLICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE FVH..... 28	
4.4. A. CONTEO DE SEMILLAS PARA PRUEBAS DE GERMINACIÓN. B. COLOCACIÓN DE 100 SEMILLAS POR PRUEBA SOBRE PAPEL ABSORBENTE. C. COBERTURA DE SEMILLAS CON PAPEL ABSORBENTE PREVIAMENTE HUMEDECIDO, A FIN DE QUE LA SEMILLA CONSERVE LA HUMEDAD. 30	
4.5. A. PESADO DE SEMILLA DE LAS DIFERENTES ESPECIES. CADA SACO CONTIENE 300 G DE SEMILLA EN PESO SECO. B. IMBIBICIÓN DE SEMILLA EN UN PERÍODO DE 20 H. 31	
4.6. SIEMBRA DE FVH EN CHAROLAS..... 32	
4.7. SEMILLA EN PROCESO DE GERMINACIÓN..... 32	
4.8. COSECHA DEL FVH. (DÍA 12)..... 36	
5.1. TEMPERATURA PROMEDIO POR DÍA DURANTE LA PRIMERA CORRIDA DEL EXPERIMENTO. LA LÍNEA ROJA REPRESENTA LOS VALORES MÁXIMOS REGISTRADOS, MIENTRAS QUE LA AZUL SIMBOLIZA LOS MÍNIMOS. 38	
5.2. TEMPERATURA PROMEDIO DE LA CORRIDA #1 CALCULADA A PARTIR DE LAS MEDICIONES REALIZADAS CADA 30 MIN. AL INTERIOR DEL INVERNADERO CON UN EQUIPO WATCHDOG DATALOGGER. LA GRÁFICA MUESTRA LOS VALORES MÍNIMOS Y MÁXIMOS REGISTRADOS DURANTE LOS INTERVALOS DE MEDICIÓN. 39	
5.3. TEMPERATURA PROMEDIO Y VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS POR DÍA REGISTRADOS AL INTERIOR DEL INVERNADERO DURANTE LA CORRIDA #2 DEL EXPERIMENTO. 40	
5.4. VALORES DE TEMPERATURA PROMEDIO CALCULADOS A PARTIR DE LAS MEDICIONES REALIZADAS CADA MEDIA HORA EN EL INVERNADERO DURANTE LA SEGUNDA CORRIDA. 40	
5.5. HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO POR DÍA CALCULADA A PARTIR DE LOS DATOS REGISTRADOS DENTRO DEL INVERNADERO DURANTE LA PRIMERA CORRIDA DEL EXPERIMENTO..... 41	
5.6. VALORES PROMEDIO DE HUMEDAD RELATIVA A PARTIR DEL MONITOREO REALIZADO CADA 30 MIN. A LO LARGO DEL DÍA, DURANTE LA CORRIDA #1..... 42	
5.7. HUMEDAD RELATIVA POR DÍA DURANTE LA SEGUNDA CORRIDA DEL EXPERIMENTO CALCULADA A PARTIR DE LOS DATOS REGISTRADOS EN EL INVERNADERO. 43	

5.8. PROMEDIOS DE HUMEDAD RELATIVA POR HORA DURANTE LA CORRIDA #2 DEL EXPERIMENTO CON SUS RESPECTIVOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS.	43
5.9. DATOS COMPARATIVOS DE RADIACIÓN SOLAR POR DÍA MEDIDOS DURANTE LA CORRIDA #1 DEL EXPERIMENTO DENTRO DEL INVERNADERO DE PRODUCCIÓN DE FVH CON UNA MALLA SOMBRA AL 50%.....	44
5.10. RADIACIÓN SOLAR TOTAL CALCULADA POR DÍA A PARTIR DE LAS MEDICIONES REALIZADAS DENTRO DEL INVERNADERO DURANTE LA CORRIDA #2 DEL EXPERIMENTO.	45
5.11. DISTRIBUCIÓN COMPARATIVA DE LOS DATOS DE ALTURA ENTRE LAS DIFERENTES ESPECIES UTILIZADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE FVH EN LA CORRIDA #1. DEL LADO DERECHO SE MUESTRA LA GRÁFICA QUE REPRESENTA LAS DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE GRUPOS DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY.	47
5.12. COMPARACIÓN ENTRE LOS PESOS HÚMEDOS DE LAS DIFERENTES ESPECIES, PRODUCTO DE LA 1ª COSECHA. LAS DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE ESPECIES DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY SE MUESTRAN EN EL GRÁFICO DEL COSTADO DERECHO.	48
5.13. DISTRIBUCIÓN DE DATOS OBTENIDOS DE LA PRIMERA CORRIDA DEL EXPERIMENTO SOBRE EL PORCENTAJE DE HUMEDAD ENTRE LAS DIFERENTES ESPECIES. A LA DERECHA SE MUESTRA LA GRÁFICA QUE REPRESENTA LAS DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE GRUPOS DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY.	49
5.14. REGISTRO Y DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS DE PESO SECO ENTRE ESPECIES DE LA CORRIDA #1 Y DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS GRUPOS DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY.....	49
5.15. PORCENTAJE DE MATERIA SECA CALCULADO A PARTIR DE LOS DATOS RESULTANTES DE LA PRIMERA CORRIDA PARA LAS DIFERENTES ESPECIES. DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY EXISTEN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE LOS GRUPOS.	50
5.16. DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE ESPECIES EN CUANTO A PRODUCTIVIDAD DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY, PRODUCTO DE LA CORRIDA #1 DEL EXPERIMENTO.	51
5.17. DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS DE ALTURA CAPTURADOS AL MOMENTO DE LA SEGUNDA COSECHA DEL FVH. LA GRÁFICA DEL COSTADO DERECHO REPRESENTA LAS DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE GRUPOS DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY.....	52
5.18. DATOS DE PESO HÚMEDO POR ESPECIE REGISTRADOS EN GRAMOS A PARTIR DE LA SEGUNDA CORRIDA. A LA DERECHA SE REPRESENTAN LAS DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS CON UNA GRÁFICA DE TUKEY.....	53
5.19. GRÁFICO ILUSTRATIVO DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD EN LAS MUESTRAS PROCESADAS DE LA CORRIDA #2 DEL EXPERIMENTO. LAS DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENCONTRADAS DE ACUERDO CON LA PRUEBA DE TUKEY, SE REPRESENTAN EN LA FIGURA DEL LADO DERECHO.....	54
5.20. DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE PESO SECO REGISTRADOS PARA LAS ESPECIES EMPLEADAS EN LA SEGUNDA CORRIDA DEL EXPERIMENTO. A LA DERECHA SE MUESTRAN REPRESENTADOS LOS DIFERENTES GRUPOS FORMADOS COMO RESULTADO DE LA PRUEBA DE TUKEY.....	54

5.21.	REPRESENTACIÓN DE LOS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS DE LA CORRIDA #2 PARA LAS DIFERENTES ESPECIES EN PORCENTAJE DE MATERIA SECA. LAS DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS CON RESPECTO A LA PRUEBA DE TUKEY SON EJEMPLIFICADAS POR LA FIGURA DE LA DERECHA.	55
5.22.	PRODUCTIVIDAD CALCULADA A PARTIR DE LOS DATOS DE PESO SECO DE LAS ESPECIES EVALUADAS EN LA SEGUNDA CORRIDA. EL GRÁFICO DE LA IZQUIERDA MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS, EL DE LA DERECHA LAS DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS DE ACUERDO A LA PRUEBA DE TUKEY.....	56
5.23.	GRÁFICO REPRESENTATIVO DE DATOS DE ALTURA OBTENIDOS EN MAÍZ CON LOS DIFERENTES RIEGOS EN LA PRIMERA CORRIDA Y SU DIFERENCIA SIGNIFICATIVA CON RESPECTO A LA PRUEBA DE TUKEY..	58
5.24.	DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS RESULTANTES DE LA SEGUNDA CORRIDA EN CUANTO A PESO HÚMEDO DE MAÍZ EN LOS DIFERENTES RIEGOS. LA GRÁFICA DEL COSTADO DERECHO REPRESENTA LAS DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS DE ACUERDO CON LA PRUEBA DE TUKEY.....	64
7.1.	ANÁLISIS DE MICROELEMENTOS EN EL AGUA PROVENIENTE DEL CULTIVO ACUÍCOLA.	78

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas convencionales de producción de forraje han venido experimentando serias dificultades marcadas por la situación actual del sector agropecuario. La búsqueda de metodologías alternativas de producción en las cuales se considere el ahorro de agua, altos rendimientos por m² ocupado, calidad nutricional, flexibilidad en la transferencia y mínimos impactos negativos sobre el medio ambiente es de particular importancia (López-Aguilar *et al.* 2009).

El Forraje Verde Hidropónico (FVH) emplea menor cantidad de agua para su producción; presenta menos problemas de plagas y enfermedades; produce forraje diariamente durante todo el año y se puede programar su producción con base en la demanda; no requiere de grandes superficies de tierras, ni períodos largos de producción, tampoco alguna forma de conservación y almacenamiento; está protegido de las lluvias, de las bajas temperaturas y de la exposición directa de los rayos del sol; es consumible en su totalidad, con raíces, tallos, hojas y restos de semillas, es además una opción en lugares con poca disponibilidad de agua, tierras no aptas para el cultivo o en climas extremos (Romero Valdez *et al.*, 2009).

La producción de FVH consiste en la germinación de semillas de gramíneas o leguminosas para su posterior crecimiento bajo condiciones ambientales controladas (luz, temperatura y humedad) en ausencia de suelo (Rivera *et al.*, 2010), con la finalidad de producir un forraje vivo de alta digestibilidad y calidad nutricional que ha constituido una opción apta para la alimentación de animales en los últimos años (López-Aguilar *et al.*, 2009).

Algunos de los factores que han dirigido la investigación hacia la búsqueda de métodos alternos de producción de alimentos para el ganado, son por una parte la necesidad de intensificar y mejorar las prácticas de producción animal de una manera sostenible, a raíz de la expansión de la frontera agrícola y ganadera, debido al incremento en la demanda de productos alimenticios, y por otro lado, la erosión del suelo y la contaminación de las aguas, que derivan en un

crecimiento estacional de los pastos debido a la irregularidad de las lluvias (Vargas R, 2008).

Actualmente, la producción de forrajes para el ganado emplea el 33 % de las tierras de cultivo agrícola. En algunos países la ampliación de las tierras empleadas para el desarrollo del sector ganadero puede contribuir a la deforestación, mientras que en otros la intensificación de la producción pecuaria puede causar un pastoreo excesivo (FAO, 2009).

La agricultura, además, es el mayor usuario de agua dulce a escala mundial y principal factor de degradación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos como consecuencia de la erosión y de la escorrentía química. A nivel mundial, las proporciones de extracción son aproximadamente 70% agropecuaria, 11% municipal y 19% industrial (FAO, NRL, 2012), de las cuales el 8% del agua empleada en el mundo corresponde específicamente al sector pecuario y se destina principalmente a la irrigación del forraje (FAO, 2009).

Aunada a la problemática que presenta el sector agrícola, la producción mundial acuícola también ha aumentado, de 1,7 millones de toneladas en 1957, a 68 millones de toneladas en 2008 (FAO, 2009), dando lugar a eutrofización y daños en los ecosistemas debido a la expansión de las áreas de cultivo.

Ante este fenómeno surge la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías de producción (Samuel-Fitwi *et al.*, 2012), en donde la acuaponía ocupa un papel importante. En esta técnica de cultivo el agua proveniente de los estanques de cultivo de peces puede ser usada para el riego agrícola con beneficios sustanciales por la reducción de alrededor de un 25% de los costos por concepto del uso de fertilizantes (León-Sánchez *et al.*, 2010).

En cuanto al sector pecuario, de acuerdo con Ramírez y colaboradores (2008) la producción forraje verde acuapónico podría resultar en una alternativa para disminuir los costos y el impacto de producción de carne bovina, porcina o aviar. Por ello, en este estudio se propone la acuaponía como una alternativa para la producción de forraje verde como un subproducto a partir de los desechos generados por un cultivo de tilapia, ya que a pesar de la gran cantidad de

información que existe en materia de producción de forraje verde hidropónico, no se conocen publicaciones con respecto a su producción en sistemas acuapónicos.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Forraje verde hidropónico (FVH)

Las semillas más utilizadas para su producción son: sorgo (*Sorghum vulgare*), maíz (*Zea mays*), cebada (*Hordeum vulgare L.*), avena (*Avena Sativa*), trigo (*Triticum aestivum*), vicia (*Vicia sativa*), entre otras (Álvarez *et al.*, 2011).

Algunos de los requerimientos para su producción se enuncian a continuación (FAO, 2001):

- El rango óptimo de temperatura para la producción de FVH se sitúa entre los 18°C y 26°C. Los granos de avena, cebada, y trigo, entre otros, requieren de temperaturas entre los 18°C a 21°C para germinar. Sin embargo el maíz, necesita de temperaturas óptimas que varían entre los 25°C y 28°C.
- La humedad relativa del recinto de producción no puede ser inferior al 90%, sin embargo, valores de humedad superiores al 90% sin buena ventilación pueden causar graves problemas fitosanitarios debido fundamentalmente a enfermedades fungosas difíciles de combatir y eliminar, mientras que una ventilación excesiva provoca la desecación del ambiente y disminución significativa de la producción por deshidratación del cultivo.
- El FVH sólo requiere una intensidad lumínica de 1.000 a 1.500 microwatts/cm² en un período de aproximadamente 12 a 14 horas diarias de luz, lo que equivale a un rango de 0.432 a 0.756 MJ/m²/día.
- La demanda hídrica para la producción de 1 kilo de FVH (forraje verde hidropónico) es de dos a tres litros de agua con un porcentaje de materia seca que oscila, dependiendo de la especie forrajera, entre un 12% a 18%.

El Cuadro 2.1 presenta los requerimientos hídricos de las especies más utilizadas para la producción de FVH.

Cuadro 2.1. Demanda hídrica de diferentes especies forrajeras (FAO, 2001).

Especie	Litros de agua / kg materia seca (promedio de 5 años)
Avena	635
Cebada	521
Trigo	505
Maíz	372
Sorgo	271

Según varias dependencias (SAGAR-INIFAP, CIRNOC, CELALA; 2000), la demanda hídrica de la alfalfa con riego por aspersión (que supone ser el más eficiente en cuanto rendimiento de kg de materia seca / m³ de agua) es de 609.76 litros para producir 1 kg de materia seca.

Otra ventaja del FVH es el tiempo de producción, el cual es bastante reducido a comparación de los métodos tradicionales. De acuerdo con la FAO (2001), la cosecha de FVH se realiza entre los días 12 a 14, sin embargo si es necesario, se puede efectuar una cosecha anticipada a los 8 días a partir de su siembra (Al-Karaki *et al.*, 2012).

Con el forraje hidropónico se puede alimentar ganado vacuno, porcino, caprino, equino, cunícola y una gran cantidad de animales domésticos con excelentes resultados (Vargas R, 2008).

De acuerdo con Hughes y colaboradores (1972), las vacas alimentadas con heno de alfalfa de primer corte, produjeron 19% más de leche por vaca y 27% más de leche por hectárea, además ganaron 109 g de peso vivo más por día que las que recibieron heno de siega más tardío, lo que supone que el suministro de un forraje verde (FVH) repercute positivamente en el rendimiento tanto en ganado lechero como en ganado de engorda.

Una estimación del rendimiento total posible de forraje verde en el sistema hidropónico es de 5425 y 5000 toneladas/ha/año (con 25 cosechas por año) para el frijol chino (*Vigna unguiculata*) y la cebada (*Hordeum vulgare*), respectivamente (Al-Karaki *et al.*, 2012).

No obstante, el comportamiento productivo del sistema de FVH depende de varios factores que incluyen las condiciones ambientales, ciclo de cultivo, variedad de la especie forrajera y tipo de fertilización, que puede ser tradicional (química) u orgánica (Salas *et al.*, 2010).

2.2. Acuaponía

El término acuaponía se refiere al cultivo de peces y plantas en un sistema de recirculación cerrado, siendo entonces el resultado de la integración de técnicas utilizadas en la hidroponía y acuicultura (Rakocy, 1999).

En el 2006, Diver define la acuaponía como un sistema bio-integrado que involucra la recirculación del agua proveniente de un sistema acuícola con la producción de vegetales, flores o hierbas en hidroponía.

Nelson (2008) menciona que en este tipo de sistemas las plantas actúan como un filtro natural del agua en la que viven los peces. Esto crea un mini ecosistema, en donde, tanto las plantas como los peces, pueden vivir y prosperar ya que el agua se reutiliza a través de filtración biológica y recirculación, mejorando su calidad sin necesidad de agregar componentes ajenos al sistema.

De acuerdo con Ramírez y colaboradores (2008), también la población bacteriana juega un papel importante en el sistema, ya que si ésta no se desarrolla lo suficiente se verán disminuidas sus capacidades de biofiltración, por lo que seguramente mostrará una producción baja comparada con plantas crecidas utilizando sistemas hidropónicos orgánicos. Sin embargo, si se deja el tiempo suficiente para que desarrolle la población bacteriana (en el caso reportado, unos seis meses), la acuaponía genera una producción mayor que la hidroponía.

En el 2010 Rinehart añade el concepto de policultivo, ya que la acuaponía resulta de la integración de componentes de dos sistemas biológicos (peces y plantas) lo que aumenta la diversidad de productos, así como sus rendimientos, debido a que los desechos de un sistema biológico sirven como nutrientes para el segundo sistema, lo que además sugiere un modelo para la producción sustentable de alimento.

Finalmente, la producción local de alimentos permite el acceso a alimentos saludables y mejora la economía local (García T, 2012).

2.2.1. Sistemas acuapónicos.

En 1928, William Frederick Gericke de la Universidad de Berkeley, en California fue el primero en sugerir que los cultivos en solución se utilizaran para la producción vegetal agrícola llamando a esta nueva técnica “nutricultura” (Gericke *et al.*, 1936). Durante la década de los 60’s Allen Cooper, en Inglaterra, desarrollo una técnica de cultivo a la que llamo Nutrient Film Technique (NFT), que consiste en generar una corriente de solución con los nutrientes apropiados y que pase de manera continua sobre la raíz de las plantas a cultivar (Cooper, 1996). John y Nancy Todd junto con William McLarney (1969) fundaron el Instituto Nueva Alquimia (New Alchemy Institute), donde construyeron un prototipo adecuado para la producción de los requerimientos de una familia durante un año de tal manera que se obtengan provisiones de peces y vegetales (Figura 2.1). Para el año 1971, en éste mismo instituto se decide comenzar la investigación sistemática sobre la irrigación de vegetales con agua proveniente de los sistemas acuícolas (McLearney, 1972). Lewis en 1976 implementa los sistemas de recirculación y filtros para mantener las condiciones adecuadas del agua (Figura 2.2). Para el año 1982 aparece una modificación al sistema donde se observa la productividad del sistema de acuerdo a la temperatura (Figura 2.3). Ya cerca de la década de los 90’s se comienza a mencionar la ventaja del cultivo en tanques y se integran la producción de plantas y los sistemas de recirculación (García T, 2012).



Figura 2.1. Prototipo de producción en acuaponía del Instituto Nueva Alquimia (Barnhart, 2006).

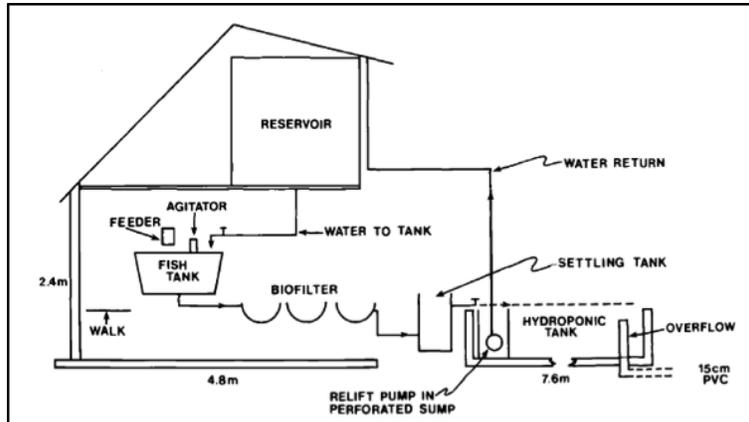


Figura 2.2. Esquema representativo del modelo de recirculación propuesto por Lewis y colaboradores desde 1976 (Lewis et al., 1978).

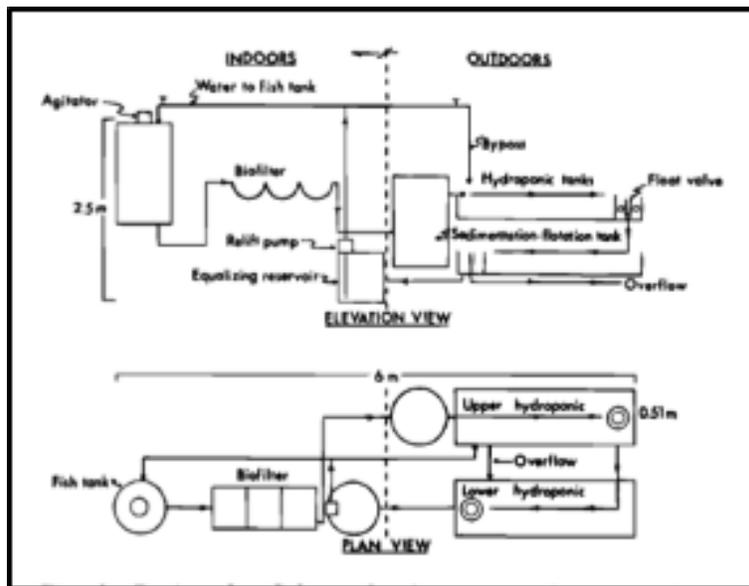


Figura 2.3. Esquema del sistema acuapónico mejorado por Sutton y Lewis en 1982.

De acuerdo a Rakocy (2003) los efluentes de la acuicultura brindan la mayor parte de los nutrientes requeridos por las plantas, si es que se mantiene la tasa alimentación diaria de los peces y el crecimiento de las plantas. En este sentido, se debe tener en cuenta la relación entre peces criados y plantas cultivadas, cuando el sistema es de recirculación. En el caso de la producción combinada y complementaria se utiliza un mismo espacio para la producción de peces y plantas para alcanzar una mayor eficiencia y rentabilidad (García T, 2012).

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1. Objetivo general.

Evaluar la productividad de cuatro sistemas de cultivo de forraje verde hidropónico (FVH).

3.2. Objetivos Particulares.

Caracterizar fisico-químicamente el agua proveniente del efluente de un cultivo acuícola para el riego del FVH en el sistema acuapónico y “mixto”.

Monitorear las condiciones climáticas en el invernadero durante el experimento.

Comparar la productividad de los cuatro sistemas de cultivo al término de la cosecha.

Analizar los costos de producción de los diferentes sistemas de cultivo.

3.3. Hipótesis.

Los sistemas acuapónico y “mixto” tendrán una productividad estadísticamente igual o mayor al sistema de producción de forraje verde con riego hidropónico, sin embargo, considerando el ahorro en insumos como fertilizantes y agua, el sistema acuapónico supone ser una buena alternativa para el cultivo de forraje verde.

4. METODOLOGÍA

4.1. Diseño experimental.

El experimento fue estructurado con un diseño factorial, en el que el primer factor está constituido por la especie forrajera: alfalfa (*Medicago sativa*), cebada (*Hordeum vulgare*) y maíz (*Zea mays*) y el segundo involucra los diferentes tipos de riego: control, acuapónico, hidropónico y mixto.

Se establecieron 12 tratamientos por triplicado, la unidad experimental está compuesta por una charola. Las dimensiones de las charolas de crecimiento son de 54cm x 27cm y 7cm de profundidad, por lo que la unidad experimental se compone de 0.1458 m². El experimento fue evaluado en dos corridas con el fin de probar de manera válida los diferentes sistemas de producción de FVH.

El arreglo de las charolas fue completamente al azar y se muestra en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Esquema de distribución del experimento.



4.2. Descripción del sitio.

El experimento se llevó a cabo en el invernadero de producción de forraje verde hidropónico, que se sitúa en el campus Amazcala de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) ubicado en el poblado de Amazcala, El Marqués, Querétaro entre los 20° 31' y 20° 58' de latitud norte, y los 100° 09' y 100° 24' de longitud oeste a 1850 m sobre el nivel del mar. El invernadero cuenta con un área de 45m² aproximadamente, posee una estructura del tipo gótico con ventilación natural por medio de ventanas laterales (*Figura 4.1*).



Figura 4.1. Ubicación del Invernadero de FVH en la Facultad de Ingeniería UAQ, Campus Amazcala.

4.3. Caracterización del agua del efluente del cultivo acuícola.

Se midieron diversos parámetros para evaluar la calidad del agua proveniente del cultivo acuícola, con el fin de monitorear la dinámica de nutrientes, así como para poder suplementar el tratamiento mixto.

Se hizo un muestreo del agua proveniente de un cultivo acuícola hiperintensivo de alevines de tilapia (*Oreochromis niloticus*) de 1 pulgada de longitud y un mes de edad, con una densidad de 270 peces/m³, establecido en un estanque de geomembrana de 3m³ en el invernadero de producción de tilapia de

la Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro (Figura 4.2) ubicado en el poblado de Amazcala, El Marqués, Querétaro.



Figura 4.2. Ubicación del Invernadero de producción de Tilapia en la Facultad de Ingeniería, UAQ Campus Amazcala.

Se tomaron las alícuotas requeridas (a partir de las muestras) para los diferentes análisis descritos a continuación. Para realizar las determinaciones se utilizaron los métodos descritos en el “HACH Water Analysis Handbook” (2002) del espectrofotómetro portátil HACH™ DR/2400, (HACH company, Loveland Colorado, USA), los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Biosistemas Acuícolas de la misma facultad.

Los parámetros medidos fueron:

- a) Nitrógeno amoniacal (NH₃-N). Se midió mediante el método de salicilato (Método HACH 8155, adaptado de Clin. Chim. Acta., 14, 403; 1966) en el cual los compuestos de amoníaco se combinan con el cloro para formar monocloramina, misma que reacciona con el salicilato para formar 5-aminosalicilatos. El 5-aminosalicilato se oxida en presencia de un catalizador nitroprusiato de sodio para formar un compuesto de color

azul. El color azul queda enmascarado por el color amarillo presente por el exceso de reactivo para dar una última solución de color verde. Los resultados del ensayo se miden a 655 nm.

- b) Nitritos (NO₂-N). Se hizo reaccionar las muestras con ácido sulfanílico para formar una sal intermediaria de diazonio. Ambos reactivos se combinan con ácido cromotrópico para producir un complejo de color rosa directamente proporcional a la cantidad de nitritos presentes. Los resultados de la prueba se miden a 507 nm. (Método HACH 8507, adaptado de USEPA, 1979).
- c) Nitratos (NO₃-N). Se midió con el método de reducción de cadmio (Método HACH 8171); el cual establece que el cadmio metálico reduce el nitrato a nitrito en la muestra. El ion nitrito reacciona con ácido sulfanílico en un medio ácido para formar la sal de diazonio, la cual al combinarse con ácido gentísico forma una solución color ámbar. Los resultados del ensayo se miden a 400 nm.
- d) Fósforo total (FT). Se analizó por medio del método de molibdovanadato (Método HACH 8048, adaptado de USEPA Standard Method 4500-P for wastewater), en el que el ortofosfato reacciona con molibdato en medio ácido para producir un complejo, que es posteriormente reducido por ácido ascórbico generando un color azul intenso característico del molibdeno. Los resultados del ensayo se miden a 880 nm.
- e) Potasio (K). Se utilizó el método de tetrafenilborato (Método HACH 8049). En éste, el potasio de la muestra reacciona con tetrafenilborato de sodio para formar el tetrafenilborato de potasio, un sólido blanco insoluble. La turbidez generada es proporcional a la concentración de potasio. Finalmente, las muestras se miden a una longitud de onda de 650 nm.

Por otro lado también se midió el pH y conductividad eléctrica con un medidor Combo pH & EC HI 98130 a prueba de agua de la marca Hanna Instruments™.

Los micronutrientes (Ca, Fe, Mn, Mg, Zn, Cu) solo fueron analizados al inicio del experimento para poder suplementar el tratamiento mixto, se tomó una muestra y se mandó a analizar por absorción atómica (NMX-AA-051-SCFI-2001), en la Unidad de Servicios Químicos de la Universidad Autónoma de Querétaro.

4.4. Sistemas de producción de FVH.

El invernadero cuenta con 2 estructuras metálicas de Perfil Tubular Rectangular (PTR) de una pulgada, con dimensiones de 5.5 m de longitud por 2 m de altura y 0.85 m de ancho, las cuales están divididas en 5 repisas y 2 secciones a lo largo (*Figura 4.3*).



Figura 4.3. Estructuras metálicas para la producción de FVH.

Los sistemas de producción evaluados fueron: a) Control, b) Hidropónico, c) Acuapónico y d) Mixto. Se establecieron dos sistemas de riego por estructura y se colocaron todas las charolas a la misma altura, ocupando una repisa por estructura (Ver Cuadro 4.1).

4.4.1. Monitoreo de variables ambientales.

Se monitorearon las condiciones de humedad relativa, temperatura y radiación dentro del invernadero con un equipo Datalogger WatchDog 1000 series de la marca Spectrum TechnologiesTM al que se le adaptó un sensor de radiación solar de la misma marca (Spectrum TechnologiesTM). Se registraron los datos cada 30 minutos durante el experimento, se colocó una malla sombra negra del

50%, sobre la cubierta del invernadero con la finalidad de atenuar la radiación y mantener las condiciones de humedad y temperatura dentro del invernadero.

4.4.2. Selección del material vegetal.

Se utilizaron semillas de tres especies diferentes: alfalfa (*Medicago sativa*), cebada (*Hordeum vulgare*) y maíz (*Zea mays*). Las especies fueron seleccionadas de acuerdo a la facilidad de adquirir la semilla en la zona de estudio. Se utilizaron semillas criollas con la finalidad de reducir costos de producción, se realizaron las respectivas pruebas de germinación para verificar su viabilidad.

4.4.3. Pruebas de germinación.

Es recomendable utilizar semilla que logre una rápida y uniforme germinación en el campo, para conseguir que la emergencia y cobertura del suelo se obtenga lo antes posible. Para ello, se realizan los test de germinación que dan una idea de la cantidad de semillas que podrían producir una planta (Sitio Argentino de Producción Animal, 2006).

Se pusieron a germinar 100 semillas de cada especie por triplicado sobre papel absorbente previamente humedecido a saturación (Figura 4.4). Las semillas fueron conservadas bajo condiciones de obscuridad en una bolsa plástica con el fin de retener la humedad hasta su germinación. Se contaron las semillas que germinaron y se calculó su viabilidad en porcentaje.

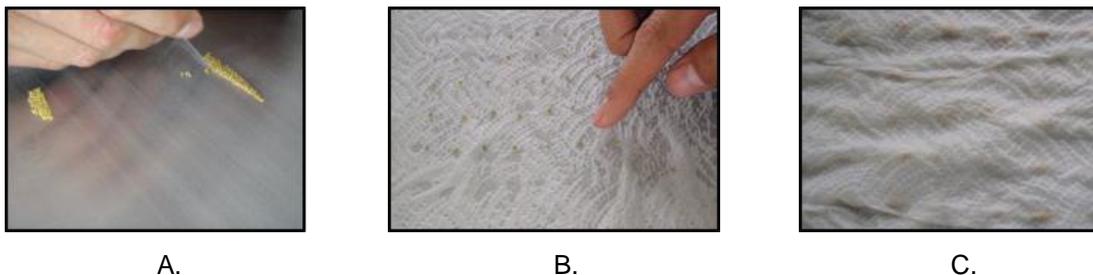


Figura 4.4. A. Conteo de semillas para pruebas de germinación. B. Colocación de 100 semillas por prueba sobre papel absorbente. C. Cobertura de semillas con papel absorbente previamente humedecido, a fin de que la semilla conserve la humedad.

4.4.4. Cantidad de semilla.

La cantidad de semilla a germinar fue determinada a partir de su contenido de materia seca, el cual se obtuvo a partir del secado de 100g de semilla de cada especie a 100°C en un horno de secado de circulación forzada marca Riossa® modelo HCF-41, posteriormente se pesaron las muestras en una balanza analítica marca Ohaus™ modelo Adventurer SR 1.11 hasta obtener un peso constante. Se calculó el porcentaje de materia seca por medio de la siguiente fórmula (A.O.A.C, 1990):

$$\% \text{ Materia Seca} = \frac{\text{Materia seca} \times 100}{\text{Peso fresco}}$$

Se elaboraron sacos de 40cm x 40cm con la misma tela con la que se forraron las charolas y se colocó lo correspondiente a 300g de materia seca de semilla en cada uno, se amarraron con rafia de manera que quedaran un poco holgados para proceder a la preparación de la semilla (Figura 4.5). El cálculo para colocar la misma cantidad de semilla en base seca es el siguiente:

$$\text{Cantidad de semilla por saco} = \frac{(300 \text{ g})(100\%)}{\% \text{ materia seca de la semilla}}$$

4.4.5. Desinfección del invernadero y material a utilizar.

Este procedimiento fue llevado a cabo con una solución de 11ml de BetaQuat® por litro de agua. Una vez preparada la solución, se desinfectó tanto el invernadero como el material utilizado por aspersión con mochila (charolas forradas con tela y lonas para la germinación).

4.4.6. Preparación de la semilla.

La semilla fue desinfectada con hipoclorito de sodio al 1% durante 2 minutos, y embebida en agua durante un período de 20 horas dividido en 2 lapsos, el primero fue de 8 horas, posteriormente se dejó orear la semilla durante una hora y se le cambió el agua con el fin de promover su oxigenación (FAO, 2001). El segundo lapso de imbibición fue de 12 horas (Figura 4.5).



Figura 4.5. A. Pesado de semilla de las diferentes especies. Cada saco contiene 300 g de semilla en peso seco. B. Imbibición de semilla en un período de 20 h.

4.4.7. Siembra.

La superficie de cada charola fue cubierta con un trozo de tela porosa llamada “organza” con el fin de evitar el contacto constante de la semilla con el agua de riego y así prevenir la formación de hongos y/o algas, además de promover la correcta aireación y condiciones adecuadas de oscuridad a nivel de raíz. Se retiraron los sacos del agua y se esparció la semilla sobre la tela, a lo largo de las charolas de la manera más homogénea posible (Figura 4.6).



Figura 4.6. Siembra de FVH en charolas.

4.4.8. Germinación.

Durante período de germinación las charolas se colocaron en el invernadero y permanecieron cubiertas con lonas negras para evitar el paso de la luz y mantener la temperatura adecuada para la germinación de la semilla (Figura 4.7). Este período comenzó a partir de la siembra y hasta el cuarto día del cultivo.



Figura 4.7. Semilla en proceso de germinación.

4.4.9. Riego.

Para el sistema de riego se instalaron 5 aspersores por sección, es decir, 10 aspersores a lo largo de toda la estructura. Los aspersores tienen un gasto de 400 ml/min y son alimentados por 4 bombas de un caballo de potencia (CP) que a su vez se alimentan por dos tinacos de 1,100 litros, y dos contenedores de 200 litros con las soluciones de riego.

Los riegos se efectuaron a partir de las 8 am hasta las 6 pm cada hora por periodos de 1 minuto (aprox. 2.4 l/charola/día), se midió el potencial hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (C.E.) iniciales en cada uno de los riegos. Los resultados de dichos parámetros se muestran en los Cuadros 4.2 a 4.5. El último día antes de la cosecha (día 11) todas las charolas fueron regadas con agua corriente para eliminar las sales restantes en el FVH (FAO, 2001).

Los riegos se manejaron de la siguiente manera:

a) Control: riego con agua corriente (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2. *Parámetros físico-químicos del agua de riego para el sistema control.*

pH	C.E.
8.3	0.45

b) Hidropónico: el riego de este sistema consistió en una solución nutritiva preparada a partir de la fórmula modificada por Álvarez (2009) en base a la solución propuesta por la FAO, 2001 (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3. *Fórmula modificada por Álvarez (2009) a partir del Manual Técnico de Forraje Verde Hidropónico propuesto por la FAO (2001) para preparar 200 l de solución hidropónica para la producción de FVH.*

FERTILIZANTE	CANTIDAD (g)
Fosfato Monoamónico	32
Nitrato de Calcio	60
Nitrato de Potasio	60
Nitrato de Magnesio	64
Sulfato de Magnesio	68
Ácido Bórico (17.5%)	1.2
Quelato de Hierro (13.2%)	16
Quelato de Manganeso (13%)	3
Quelato de Zinc (14%)	0.8
Quelato de Cobre (14%)	1
pH: 5.8*	C.E.: 1.97
*El pH fue ajustado con 15 ml de ácido sulfúrico al 99.9%	

c) Acuapónico: se regó con agua proveniente del cultivo acuícola hiperintensivo de alevines de tilapia (*Oreochromis niloticus*). (Ver sección 5.1 *Caracterización del agua del efluente del cultivo acuícola*).

Cuadro 4.4. *Parámetros físico-químicos del agua de riego para el sistema acuapónico.*

pH	C.E.
8.7*	0.59
*No se logró ajustar el pH del agua debido a que actúa como una solución tampón.	

d) Mixto: para preparar la solución nutritiva de riego para este sistema se realizó un balance restando los iones contenidos en el agua del cultivo acuícola a la fórmula utilizada para el riego del sistema hidropónico (Álvarez A, 2009), y se suplementó el agua de riego del sistema acuapónico, únicamente con los fertilizantes faltantes para balancear la solución.

Cuadro 4.5. *Cantidades de fertilizante empleadas para preparar 200 l de solución de riego para el sistema "mixto" para la producción de FVH.*

FERTILIZANTE	CANTIDAD (g)
Fosfato Monoamónico	32.11
Nitrato de Calcio	43.85
Nitrato de Potasio	42.56
Nitrato de Magnesio	99.58
Sulfato de Magnesio	46.93
Ácido Bórico (17.5%)	1.2
Quelato de Hierro (13.2%)	15.97
Quelato de Manganeso (13%)	2.98
Quelato de Zinc (14%)	0.736
Quelato de Cobre (14%)	0.912
pH: 7.1*	C.E.: 1.90
*No se logró ajustar el pH, sin embargo en base al balance de nutrientes se agregaron 4.6 ml de de ácido sulfúrico al 99.9% de pureza con el fin de completar los requerimientos de azufre.	

La comparación del contenido de iones y elementos en ppm en cada una de las soluciones de riego se presenta a continuación en el Cuadro 4.6.

Cuadro 4.6. Cuadro comparativo del balance iónico y parámetros físico-químicos de los riegos de los diferentes sistemas evaluados.

ION/ ELEMENTO	TIPO DE RIEGO			
	CONTROL	HIDROPÓNICO	ACUAPÓNICO	MIXTO
	PPM (mg/l)			
Nitrato (NO ₃) ⁻	-	114.7	0.7	114.7
Amonio (NH ₄) ⁺	-	27.84	0.04	27.84
Fósforo (PO ₄) ⁻³	-	308.93	1.25	308.93
Potasio (K)	-	110.1	32	110.1
Azufre (S)	-	43.86	-	43.86
Magnesio (Mg)	-	86.14	0.0862	86.14
Calcio (Ca)	-	55.8	15.02	55.8
Manganeso (Mn)	-	1.95	0.0107	1.95
Zinc (Zn)	-	0.56	0.045	0.56
Boro (B)	-	10.5	-	10.5
Fierro (Fe)	-	10.56	0.0201	10.56
Cobre (Cu)	-	0.7	0.062	0.7
pH	8.3	5.8	8.7	7.1
Conductividad eléctrica (C.E.)	0.45	1.97	0.59	1.90

4.4.10. Evaluación de rendimiento.

La cosecha se realizó a los 8 días después de la germinación (12 días a partir de la siembra). Se registró altura (cm), peso húmedo (g) y seco (g) por charola. Las muestras de FVH cosechado se colocaron en bolsas de papel estraza para proceder a su secado en un horno de convección de aire forzado marca Yamato™ modelo DKN900 a 80°C hasta obtener un peso constante (Kalra, 1998) en una balanza marca Torrey® modelo L-EQ 10.

Además se calculó el porcentaje de humedad a partir de la siguiente ecuación (A.O.A.C, 1990):

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(A - B) \times 100}{\text{Peso fresco (g)}}$$

Donde:

A = Peso húmedo (g)

B = Peso seco (g)

El porcentaje de materia seca se obtuvo a partir de la ecuación que se muestra en seguida (A.O.A.C, 1990):

$$\% \text{ Materia seca} = \frac{\text{Peso seco (g)} * 100}{\text{Peso húmedo (g)}}$$

Los índices de productividad de los diferentes sistemas de riego se estimaron a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Peso seco (Kg)} \times 365 \text{ días/año}}{\text{Área de la charola} \times \text{Días del cultivo}}$$



Figura 4.8. Cosecha del FVH. (Día 12)

4.5. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza de 95% con el programa JMP 9.0.1. (SAS Institute), así como las respectivas pruebas de Tukey para evaluar diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los factores especie y riego, con las variables de respuesta evaluadas al momento de la cosecha y un valor α de 0.05.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización del agua del efluente del cultivo acuícola.

Los resultados de los análisis de macroelementos en el agua proveniente del cultivo acuícola de tilapia (*Oreochromis niloticus*) se presentan en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Resultados de la caracterización de agua para los riegos acuapónico y mixto.

Parámetros	mg/l
NO ₂ -N	0.003
NO ₃ -N	0.7
NH ₃ -N	0.04
PO ₄	1.25
K	32

Los resultados del análisis de microelementos se muestran en la Figura 7.1 en la sección VII (Anexos).

5.2. Sistemas de producción de FVH.

5.2.1. Monitoreo de variables ambientales.

5.2.1.1. Temperatura.

El monitoreo del comportamiento de la temperatura en el invernadero durante ambas corridas del experimento se representa en las Figuras que se muestran a continuación:

5.2.1.1.1. Primera corrida.

La primera corrida comprendió del 27 de septiembre al 9 de octubre del 2012, durante dicho periodo se observó poca variabilidad entre los valores de temperatura calculados para los primeros días (día 0 - 4), a partir de las mediciones realizadas en el invernadero. La temperatura promedio fue de

19.18°C, con una máxima de 35.4°C, el día 2 a las 15:00 hrs. y una mínima de 3.2°C el día 7 a las 7:30 hrs. La Figura 5.1 muestra un descenso de la temperatura promedio del día 5 al 11 (a partir del comienzo de los riegos), misma que se reestableció hasta el día de la cosecha (día 12).

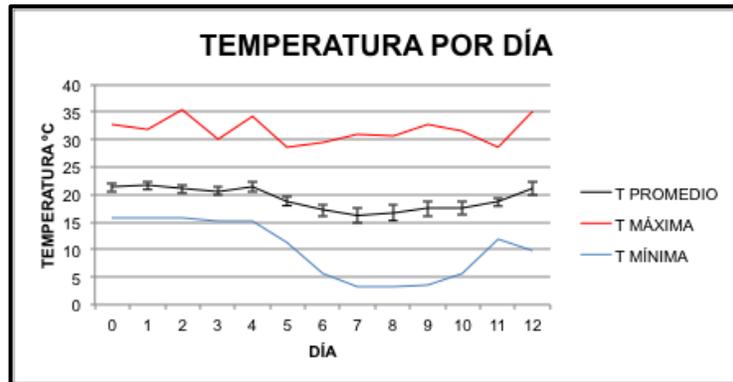


Figura 5.1. Temperatura promedio por día durante la primera corrida del experimento. La línea roja representa los valores máximos registrados, mientras que la azul simboliza los mínimos.

La relación de temperatura por hora (Figura 5.2) muestra un comportamiento relativamente regular. A partir de las 8:30 hrs. se observó un aumento gradual en la temperatura promedio dentro del invernadero que llegó hasta los 30.27°C a las 15:00 hrs.; posteriormente la temperatura comenzó a descender hasta alcanzar el promedio más bajo de 10.63°C a las 7:30 hrs. Estos valores corresponden a la primera corrida.

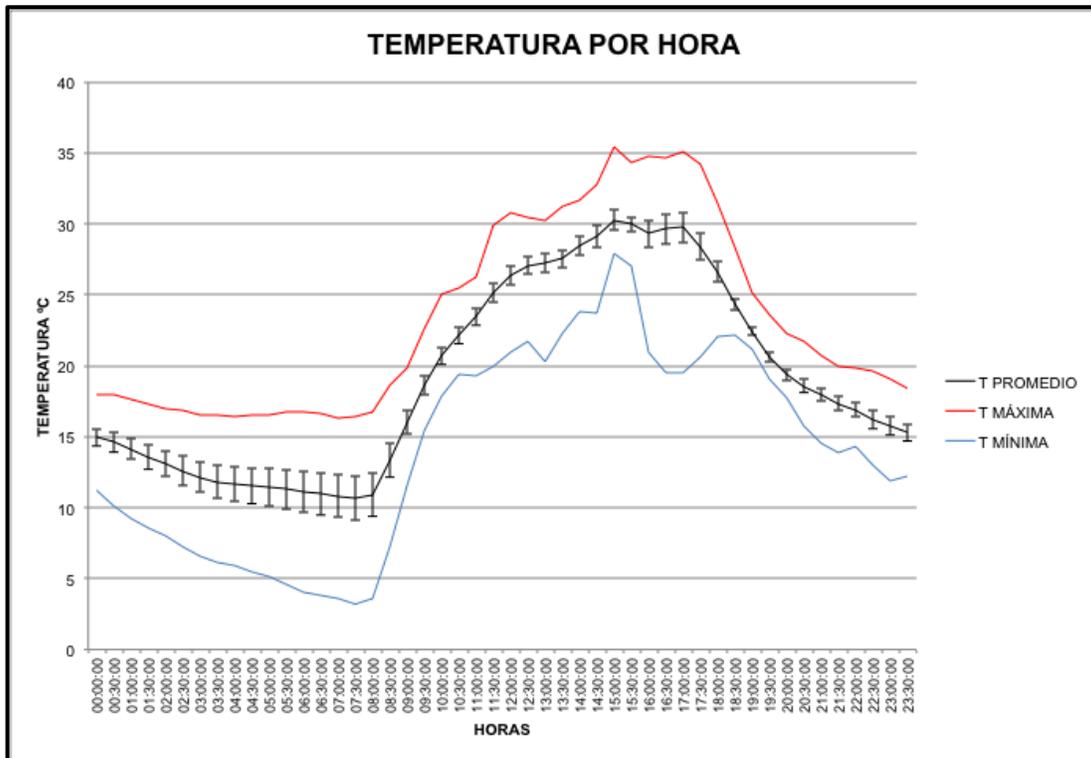


Figura 5.2. Temperatura promedio de la corrida #1 calculada a partir de las mediciones realizadas cada 30 min. al interior del invernadero con un equipo WatchDog Datalogger. La gráfica muestra los valores mínimos y máximos registrados durante los intervalos de medición.

5.2.1.1.2. Segunda corrida.

Las gráficas siguientes representan la variación de temperatura en el invernadero durante la segunda corrida del experimento que fue llevada a cabo del día 11 al 23 de octubre del 2012, el promedio de la temperatura registrada fue de 19.90°C.

La Figura 5.3 presenta un comportamiento mucho menos variable en la segunda corrida, a diferencia de la primera. La temperatura mínima registrada fue de 6°C el día 5 a las 8:00 hrs., a diferencia de la máxima que fue de 33.9°C el día 3 a las 17:00 hrs. La temperatura promedio más alta se observó el día 2 con 21.47°C, mientras que la más baja fue de 18.18°C calculada a partir de las mediciones realizadas el día 5.

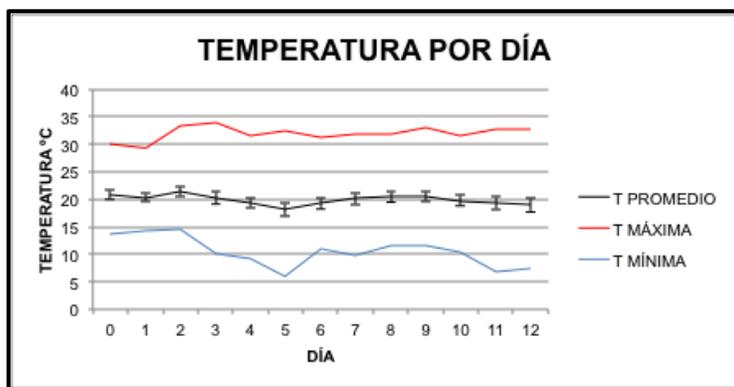


Figura 5.3. Temperatura promedio y valores máximos y mínimos por día registrados al interior del invernadero durante la corrida #2 del experimento.

La gráfica que representa el promedio de temperatura por hora (Figura 5.4) muestra que al igual que en la primera corrida, existe un aumento gradual en la temperatura (cada 30 mins.) a partir de las 8:30 hrs., el cual alcanza en promedio los 30.97°C a las 16:30 hrs. A partir de dicha hora la temperatura vuelve a descender hasta alcanzar el valor mínimo de temperatura (en promedio) de 10.69°C a las 8:00 hrs.

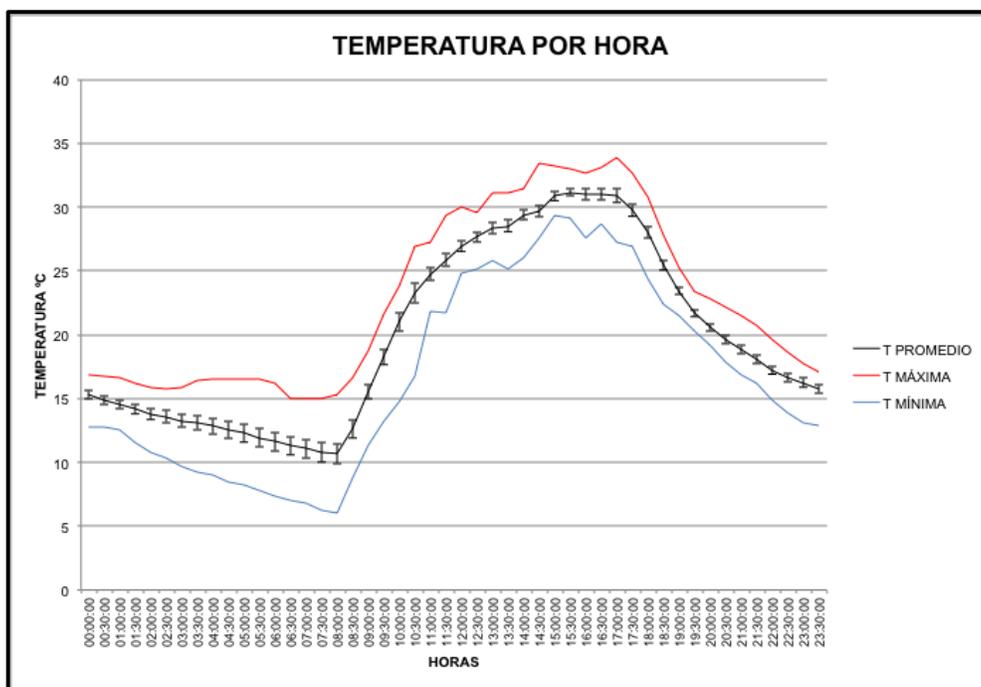


Figura 5.4. Valores de temperatura promedio calculados a partir de las mediciones realizadas cada media hora en el invernadero durante la segunda corrida.

A pesar de que las condiciones climáticas en el invernadero no fueron del todo homogéneas, los ciclos comprendidos en el experimento fueron productivos.

El rango de temperatura registrado en el invernadero durante ambas corridas comprendió desde los 3.2°C hasta los 35.4°C, el cual es bastante amplio. Para ello se sugieren algunas modificaciones como la automatización de las ventanas del invernadero y la colocación de una malla térmica para mantener la temperatura dentro del mismo, sobre todo durante la noche y las primeras horas del día, que es cuando se registran las temperaturas más bajas en el invernadero.

5.2.1.2. Humedad Relativa.

5.2.1.2.1. Primera corrida.

La humedad relativa (HR) tuvo bastantes fluctuaciones por día durante la corrida #1 (Figura 5.5), con un rango que va desde un 32.25% hasta un 68.20%, en el día 9 y 3 respectivamente. La HR en el invernadero tuvo una disminución generalizada del día 4 al 10, que curiosamente concuerda con la disminución en la temperatura observada desde el día 5 hasta el 11. Los valores máximo y mínimo registrados durante la primera corrida son de 86% que corresponde al día 0 a las 9:00 hrs. y 9.3% el día 9 a las 17:00 hrs., respectivamente. La HR promedio durante la primera corrida es de 50.47%

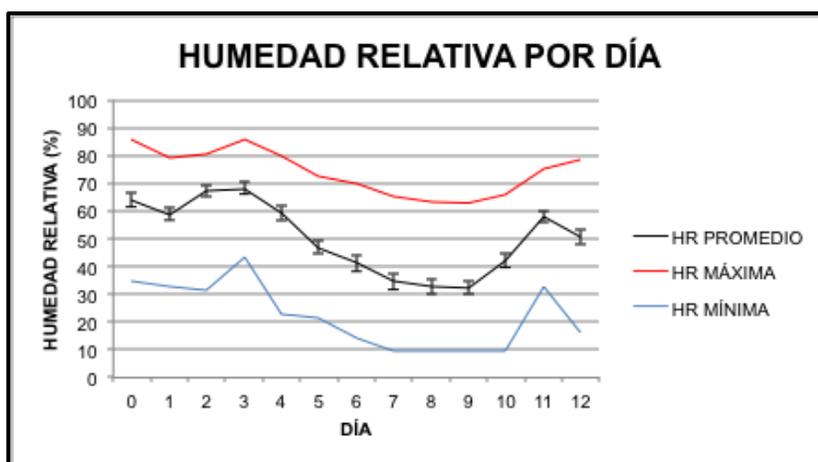


Figura 5.5. Humedad relativa promedio por día calculada a partir de los datos registrados dentro del invernadero durante la primera corrida del experimento.

En la Figura 5.6 se observa un descenso continuo en la humedad relativa en el invernadero durante la corrida #1 que va desde las 9:00 hrs. Con un valor de 68.29% y hasta las 15:30 hrs. cuando se alcanzó el valor mínimo en promedio de 25.30%. A partir de las 16:00 hrs. Los valores comienzan a aumentar de nuevo hasta alcanzar un valor promedio máximo de 72.75% a las 8:30 hrs.

En la primera corrida se presenta un comportamiento inversamente proporcional entre la temperatura y la HR.

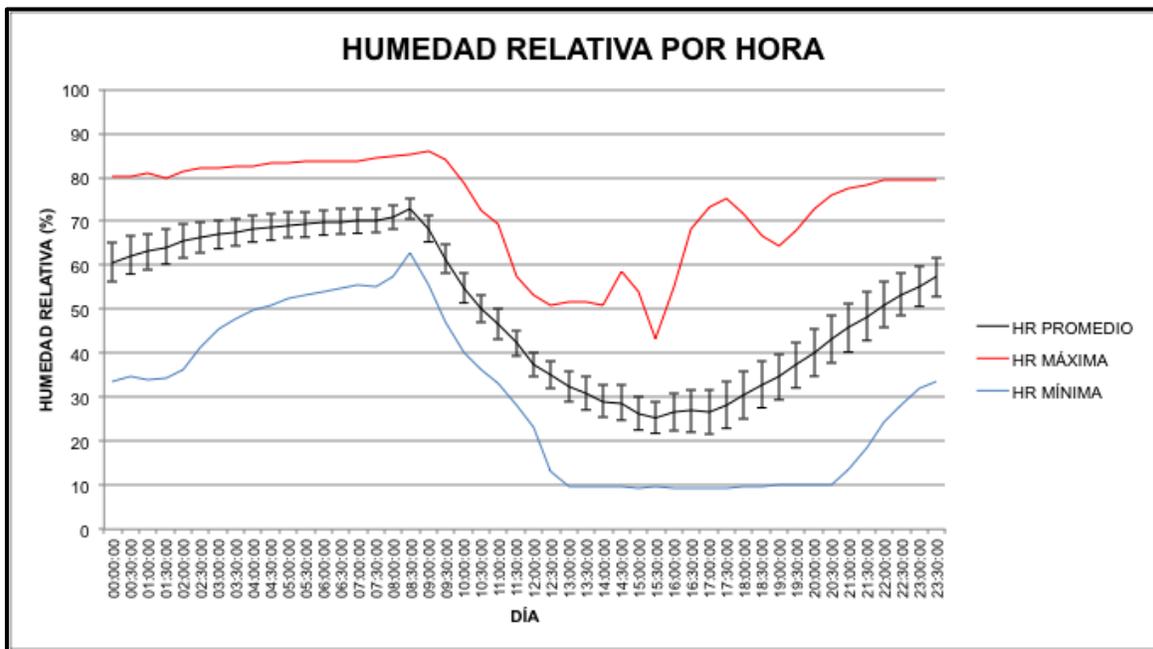


Figura 5.6. Valores promedio de humedad relativa a partir del monitoreo realizado cada 30 min. A lo largo del día, durante la corrida #1.

5.2.1.2.2. Segunda corrida.

Durante la segunda corrida, al igual que en la temperatura, se observó un comportamiento más estable en la humedad relativa con valores que van desde un 42.89% en el día 4, hasta un 54.44% en el día 9 (Figura 5.7). El valor máximo registrado es de 77.3%, el día 9 a las 9:00 hrs. y el mínimo fue de 9.4% los días 3 y 4 a las 17:00 hrs. El promedio fue de 50.33%.

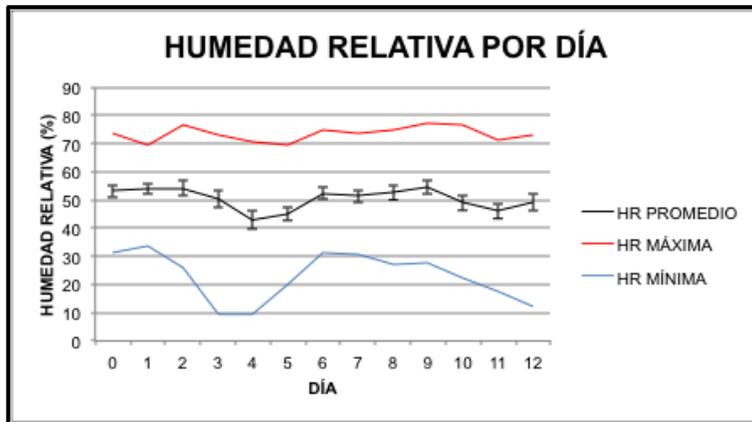


Figura 5.7. Humedad relativa por día durante la segunda corrida del experimento calculada a partir de los datos registrados en el invernadero.

Como se puede apreciar en la Figura 5.8, la humedad relativa en la segunda corrida tiene un comportamiento muy semejante con respecto a la primera corrida. La primera parte del día se observa una tendencia que va en ascenso hasta las 8:30 hrs., cuando se alcanza el mayor valor promedio de 72.92%. A partir de dicha hora y hasta las 17:00 hrs la tendencia es contrastante con un descenso que llega hasta el 23.54%, correspondiente al valor mínimo en promedio.

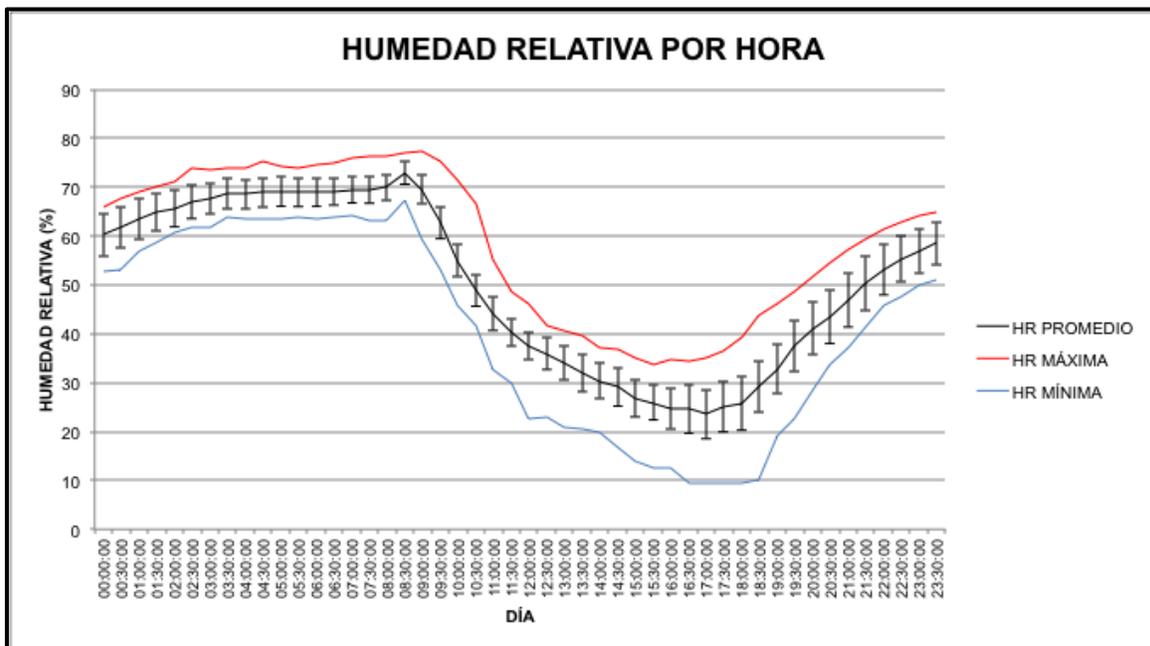


Figura 5.8. Promedios de humedad relativa por hora durante la corrida #2 del experimento con sus respectivos valores máximos y mínimos.

Las condiciones de humedad registradas mostraron valores desde 9.4% hasta 86%, a pesar de no ser las más adecuadas para el cultivo de FVH, el amplio rango resultó ser una buena estrategia para evitar la persistencia de enfermedades fúngicas; que si bien hubo incidencia, éstas fueron controladas a tiempo.

Compatibilizar el porcentaje de humedad relativa con la temperatura óptima es una de las claves para lograr una exitosa producción de FVH (FAO, 2001).

5.2.1.3. Radiación.

5.2.1.3.1. Primera corrida.

Los datos de radiación solar obtenidos durante la primera corrida muestran una relación inversamente proporcional con respecto a la temperatura en el invernadero, ya que los días más fríos resultaron ser los de mayor incidencia de radiación solar como lo representa la Figura 5.9 (día 5 - 10). El día que se registró una menor incidencia de radiación fue el séptimo con 11.79 MJ/m²/día, a diferencia del día 3 que tuvo el menor valor: 6.80 MJ/m²/día. La radiación total medida durante la primera corrida fue de 126.44 MJ/m².

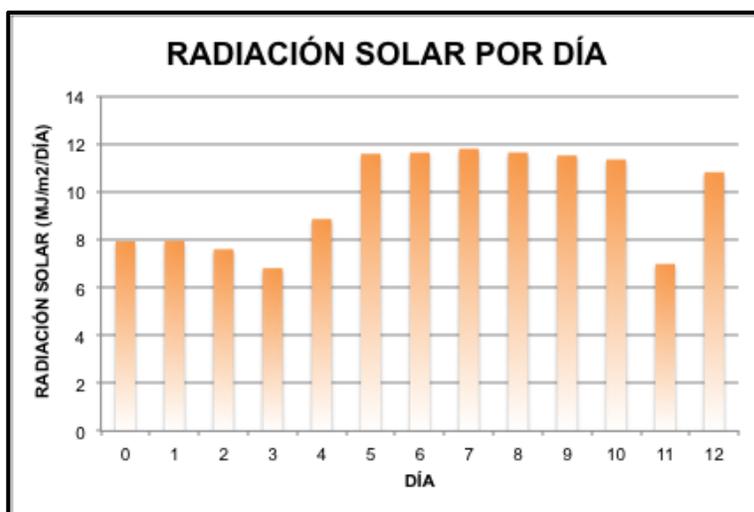


Figura 5.9. Datos comparativos de radiación solar por día medidos durante la corrida #1 del experimento dentro del invernadero de producción de FVH con una malla sombra al 50%.

5.2.1.3.2. Segunda corrida.

Durante la segunda corrida del experimento se obtuvieron datos menos variables en cuanto a radiación solar (Figura 5.10), con un rango que va desde los 7.36 MJ/m²/día registrados en el día 7, hasta los 10.95 MJ/m²/día obtenidos durante el cuarto día. La radiación total medida en el invernadero fue de 122.88 MJ/m². Cabe destacar que la relación inversamente proporcional entre radiación y temperatura observada en la corrida #1, no es una constante para la segunda corrida.

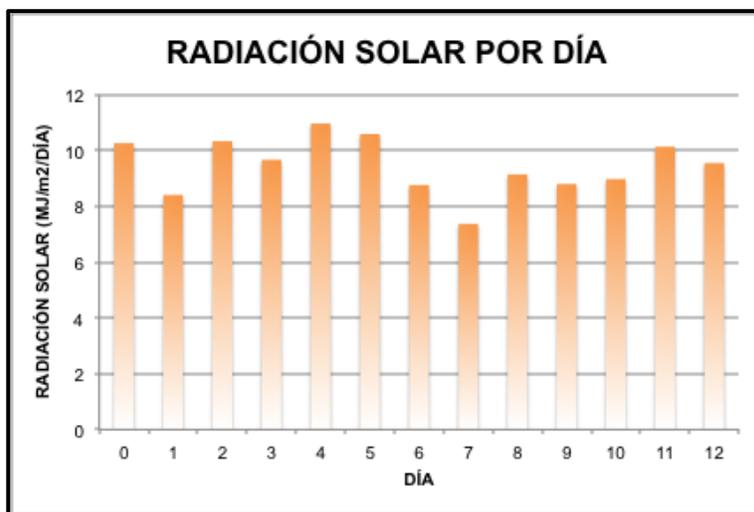


Figura 5.10. Radiación solar total calculada por día a partir de las mediciones realizadas dentro del invernadero durante la corrida #2 del experimento.

La radiación incidente sobre el invernadero fue desde los 6.80 MJ/m²/día hasta los 11.79 MJ/m²/día; que de acuerdo con la FAO (2001) excede del rango óptimo para la producción de FVH. Para contrarrestar la radiación solar excedente se podría colocar una malla sombra de mayor porcentaje.

5.2.2. Pruebas de germinación.

Los resultados de las pruebas de germinación se muestran a continuación en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.2. Porcentaje de germinación de las semillas utilizadas en el experimento.

ESPECIE	REPETICIÓN #1	REPETICIÓN #2	REPETICIÓN #3	MEDIA (%)
Alfalfa	59/100	78/100	92/100	76.33%
Cebada	77/100	93/100	94/100	88%
Maíz	91/100	91/100	90/100	90.66%

5.2.3. Cantidad de semilla.

La cantidad de semilla colocada por charola se definió de acuerdo al porcentaje de materia seca obtenido a partir de 100 g de semilla fresca, el cual se establece en el siguiente Cuadro:

Cuadro 5.3. Cantidad de semilla utilizada para cada especie por charola.

ESPECIE	Peso húmedo (g)	Peso Seco (g)	% Materia seca (g)	Cantidad de semilla (g) / charola
Alfalfa	100.00	92.36	92.35%	324.85~325
Cebada	100.01	89.42	89.41%	335.53~335
Maíz	100.17	86.68	86.52%	346.7~345

5.2.4. Evaluación del rendimiento.

Los datos que se presentan a continuación derivan de las cosechas realizadas para ambas corridas, a los 12 días a partir de la siembra. Se cosechó la charola completa para evitar sesgo en la información por efectos de muestreo.

5.2.4.1. Análisis comparativo entre las especies evaluadas.

5.2.4.1.1. Primera corrida.

A pesar de que existen marcadas diferencias en cuanto a peso húmedo, altura y porcentaje de humedad entre las especies (parámetros en los que destacan la alfalfa y cebada con los valores más altos); los resultados en base seca muestran que el mayor rendimiento en peso seco obtenido es para el maíz con una media de 280.58 g, que se encuentra por encima de la alfalfa y cebada con 249.91 g y 216.25 g respectivamente; por lo que, la especie más productiva después del maíz es la cebada, la cual contiene un mayor porcentaje de materia seca que la alfalfa (Cuadro 5.4).

Cuadro 5.4. Análisis de varianza de las variables de respuesta evaluadas entre las diferentes especies utilizadas para la producción de forraje verde durante la primera corrida. Los superíndices indican diferencias significativas entre los grupos con un valor $p < 0.05$ de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$).

PARÁMETRO	ESPECIE			F	P
	Alfalfa	Cebada	Maíz		
Altura (cm)	7.7083 ^b ±0.5054	18.9583 ^a ±0.9894	9.5417 ^b ±0.6380	66.5817	<0.0001
Peso húmedo (g)	1636.67 ^a ±129.87	1302.75 ^b ±80.36	561.17 ^c ±13.28	38.6834	<0.0001
% Humedad	84.1130 ^a ±1.0841	82.1381 ^a ±2.0342	49.6128 ^b ±1.4973	149.0390	<0.0001
Peso seco (g)	249.917 ^{ab} ±16.150	216.250 ^b ±5.297	280.583 ^a ±1.743	10.6409	0.0003
% Materia seca	15.8870 ^b ±1.0841	17.8619 ^b ±2.0342	50.3872 ^a ±1.4973	149.0390	<0.0001
Productividad (Kg MS/m ² /año)	52.1374 ^{ab} ±3.3692	45.1139 ^b ±1.1051	58.5350 ^a ±0.3636	10.6409	0.0003

5.2.4.1.1.1. Altura.

Como se puede observar en la Figura 5.11, la especie que obtuvo mayores registros de altura fue la cebada, el valor más alto fue de 23 cm en contraste con 6 cm obtenidos en alfalfa y maíz, sin embargo en la cebada hubo una mayor variación entre los datos (Cuadro 5.4). De acuerdo a la prueba de Tukey, existe una diferencia significativa de altura entre la cebada con respecto a la alfalfa y el maíz, los cuales entran en el mismo grupo.

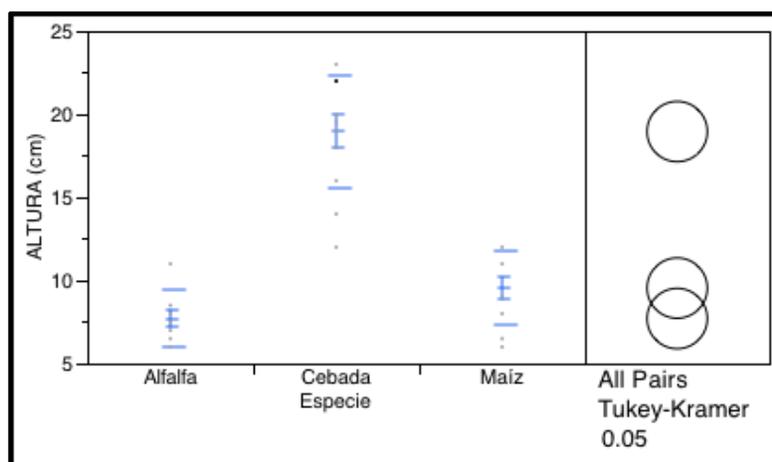


Figura 5.11. Distribución comparativa de los datos de altura entre las diferentes especies utilizadas para la producción de FVH en la corrida #1. Del lado derecho se muestra la gráfica que representa las diferencias significativas entre grupos de acuerdo a la prueba de Tukey.

5.2.4.1.1.2. Peso húmedo.

Los mayores registros de peso húmedo fueron para la alfalfa con 2.549 kg, contrastando con el maíz, donde el valor más bajo encontrado fue de 0.476 kg, sin embargo, en alfalfa se encontró la mayor dispersión de datos (Cuadro 5.4). El análisis realizado para este parámetro de acuerdo a la prueba de Tukey arroja como resultado un valor $p < 0.0001$, lo que supone una diferencia significativa entre grupos (Figura 5.12).

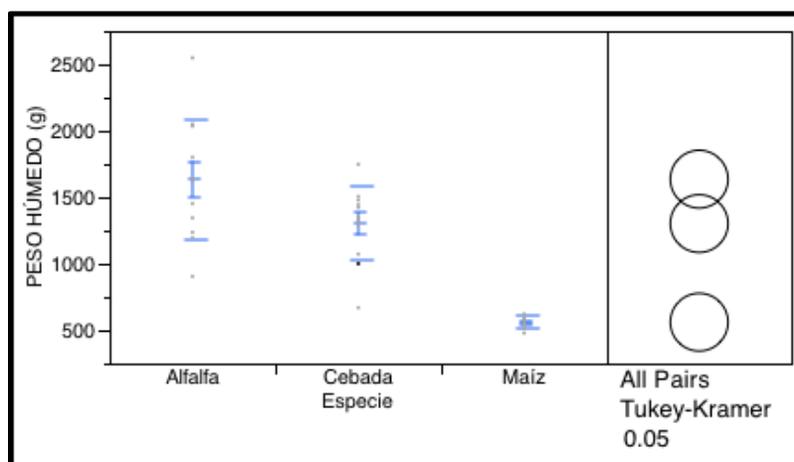


Figura 5.12. Comparación entre los pesos húmedos de las diferentes especies, producto de la 1ª cosecha. Las diferencias significativas entre especies de acuerdo a la prueba de Tukey se muestran en el gráfico del costado derecho.

5.2.4.1.1.3. Porcentaje de humedad.

De acuerdo a la prueba de Tukey se observan nuevamente diferencias significativas (Figura 5.13). En maíz se obtuvieron los menores porcentajes de humedad que están entre 39.66% y 57.30%. La cebada y la alfalfa, tuvieron valores de 61.94% a 86.71% y de 75.13% a 89.22% respectivamente (Cuadro 5.4).

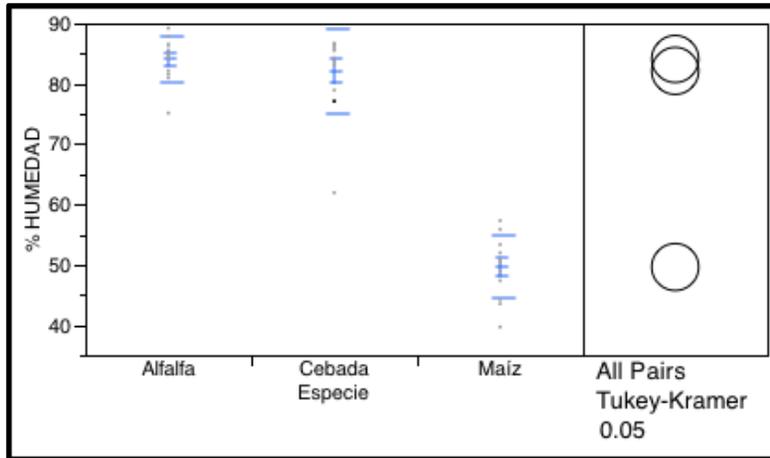


Figura 5.13. Distribución de datos obtenidos de la primera corrida del experimento sobre el porcentaje de humedad entre las diferentes especies. A la derecha se muestra la gráfica que representa las diferencias significativas entre grupos de acuerdo a la prueba de Tukey.

5.2.4.1.1.4. Peso seco.

En alfalfa se observa una gran dispersión de los datos (Figura 5.14) con registros de peso seco que van desde 194 g hasta 391 g, es por ello que pertenece a ambos grupos (cebada y maíz) de acuerdo a los resultados de la prueba de Tukey, la cual señala una diferencia significativa entre el maíz y la cebada. Para dichos grupos los valores promedio son de 280.58 g y 216.25 g respectivamente.

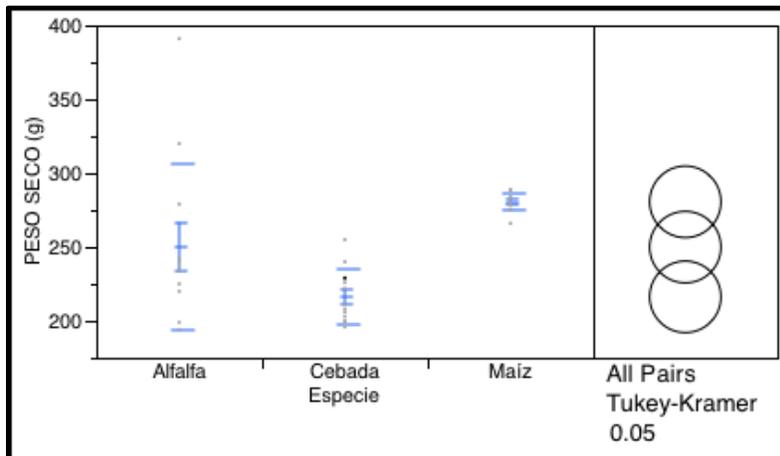


Figura 5.14. Registro y distribución de los datos de peso seco entre especies de la corrida #1 y diferencias significativas entre los grupos de acuerdo a la prueba de Tukey.

5.2.4.1.1.5. Porcentaje de materia seca.

Los porcentajes de materia seca (MS) calculados para alfalfa y cebada tienen un comportamiento parecido, con promedios de 15.88% y 17.86% respectivamente; por lo que entran en un grupo haciendo referencia a la prueba de Tukey (Figura 5.15), en contraste con el maíz que su contenido de MS es mucho mayor (50.38% en promedio), generando una diferencia significativa entre especies (Cuadro 5.4).

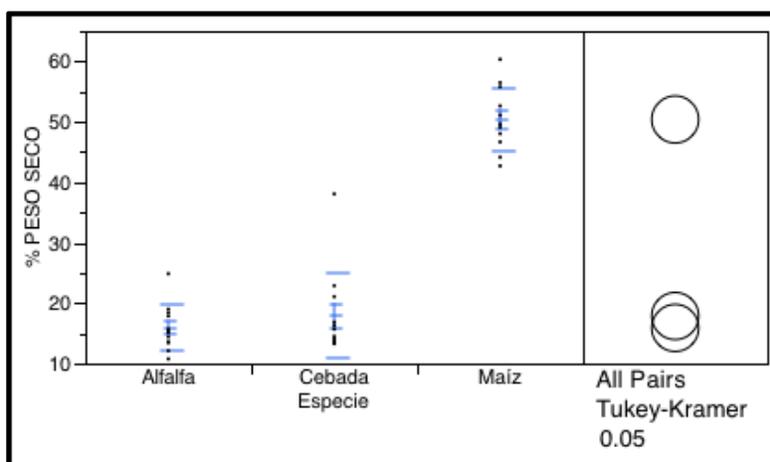


Figura 5.15. Porcentaje de Materia seca calculado a partir de los datos resultantes de la primera corrida para las diferentes especies. De acuerdo a la prueba de Tukey existen diferencias significativas entre los grupos.

5.2.4.1.1.6. Índices de productividad.

Los índices de productividad remarcan las diferencias significativas existentes (con respecto a la prueba de Tukey) entre las especies evaluadas (Figura 5.16), entre las cuales sobresale el maíz como la especie más apta para la producción de forraje verde, ya que se obtienen mejores rendimientos en materia seca por unidad de área (m^2) al año (Cuadro 5.4).

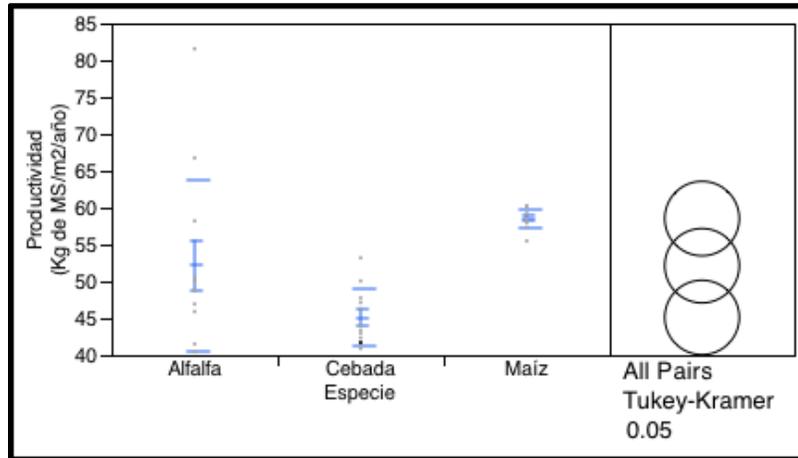


Figura 5.16. Diferencias significativas entre especies en cuanto a productividad de acuerdo a la prueba de Tukey, producto de la corrida #1 del experimento.

5.2.4.1.2. Segunda corrida.

Nuevamente se encontraron evidentes diferencias significativas en todas las variables evaluadas con respecto a la prueba de Tukey (Cuadro 5.5). Los mayores valores en cuanto a peso seco, porcentaje de materia seca y productividad siguen siendo para el maíz, sin embargo a diferencia de la primera corrida, el segundo lugar es ocupado por la cebada, por tanto, la alfalfa ocupa el último lugar. Las diferencias de peso seco a pesar de ser significativas, no son tan drásticas como las de porcentaje de materia seca, en las que el contenido en maíz es poco más de cuatro veces mayor que el de la alfalfa, aunque en términos de productividad, la alfalfa supera por poco la mitad de la productividad del maíz .

Cuadro 5.5. Análisis estadístico de las variables de respuesta evaluadas en las diferentes especies involucradas en el experimento durante la corrida #2. De acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) los resultados de la comparación entre grupos con un valor $p < 0.05$ indican diferencias significativas.

PARÁMETRO	ESPECIE			F	P
	Alfalfa	Cebada	Maíz		
Altura (cm)	10.6250 ^b ±0.35422	19.3750 ^a ±0.56784	12.2083 ^b ±0.57557	83.6954	<0.0001
Peso húmedo (g)	2279.08 ^a ±146.43	1393.42 ^b ±53.95	673.25 ^c ±22.04	78.1425	<0.0001
% Humedad	91.0869 ^a ±1.4436	84.9157 ^b ±0.7442	61.3073 ^c ±1.5255	149.2739	<0.0001
Peso seco (g)	180.833 ^c ±7.4608	205.833 ^b ±2.0257	256.833 ^a ±2.6194	67.5534	<0.0001
% Materia Seca	8.9131 ^c ±1.4436	15.0843 ^b ±0.7442	38.6927 ^a ±1.5255	149.2739	<0.0001
Productividad (Kg MS/m ² /año)	37.7253 ^c ±1.5565	42.9408 ^b ±0.4226	53.5803 ^a ±0.5465	67.5534	<0.0001

5.2.4.1.2.1. Altura.

Las diferencias de altura entre las especies son significativas con respecto a la prueba de Tukey (Figura 5.17), ya que hubo un rango bastante variable que va de los 8 a los 22 cms. Curiosamente los valores más bajos en promedio corresponden a la alfalfa (10.62 cm), sin embargo, el valor más bajo registrado fue de 8 cm para el maíz. La especie de mayor altura fue nuevamente la cebada, aunque a diferencia de la primera corrida, se alcanzó a apreciar un incremento en altura en general en las 3 especies, siendo más marcado el aumento en maíz y alfalfa (Cuadro 5.5).

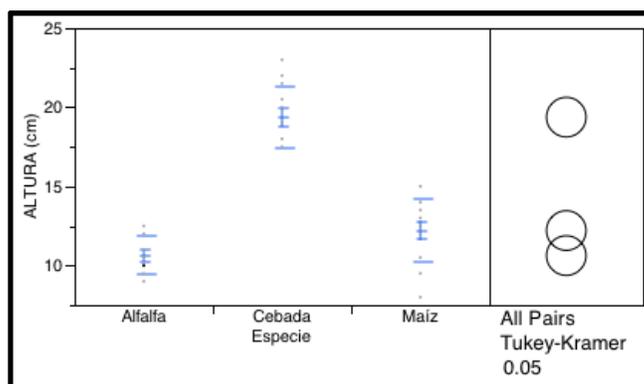


Figura 5.17. Distribución de los datos de altura capturados al momento de la segunda cosecha del FVH. La gráfica del costado derecho representa las diferencias significativas entre grupos de acuerdo a la prueba de Tukey.

5.2.4.1.2.2. Peso húmedo.

El mayor promedio de peso húmedo corresponde a la alfalfa con 2279.08 g, en contraste con el menor que fue de 673.25 g en el maíz (Cuadro 5.5). Las significancia de las diferencias se refleja en los valores analizados (Figura 5.18) que van desde un mínimo de 560 g en maíz, hasta los 2569 g para alfalfa.

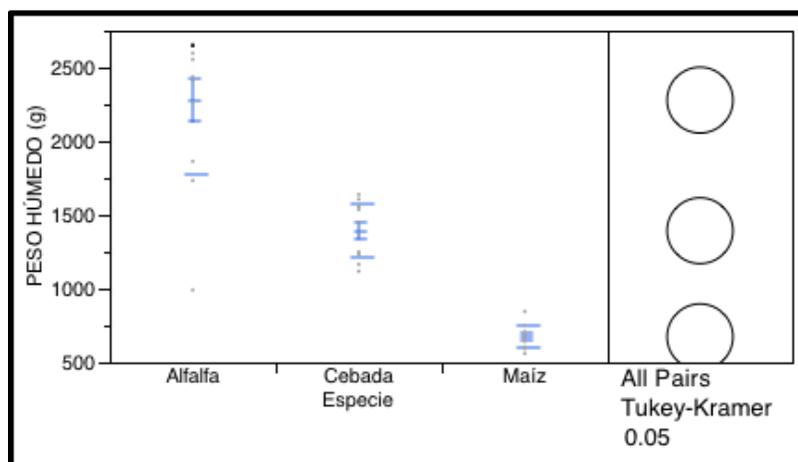


Figura 5.18. Datos de peso húmedo por especie registrados en gramos a partir de la segunda corrida. A la derecha se representan las diferencias significativas con una gráfica de Tukey.

5.2.4.1.2.3. Porcentaje de humedad.

Los datos de porcentaje de humedad entre especies presentan diferencias significativas con respecto a la prueba de Tukey (Figura 5.19), además de una relación proporcional con respecto a los de peso húmedo. Los mayores valores fueron encontrados en alfalfa con un promedio de 91.08%, mientras que en el maíz se encontró el menor porcentaje de humedad que corresponde en promedio al 61.30% (Cuadro 5.5).

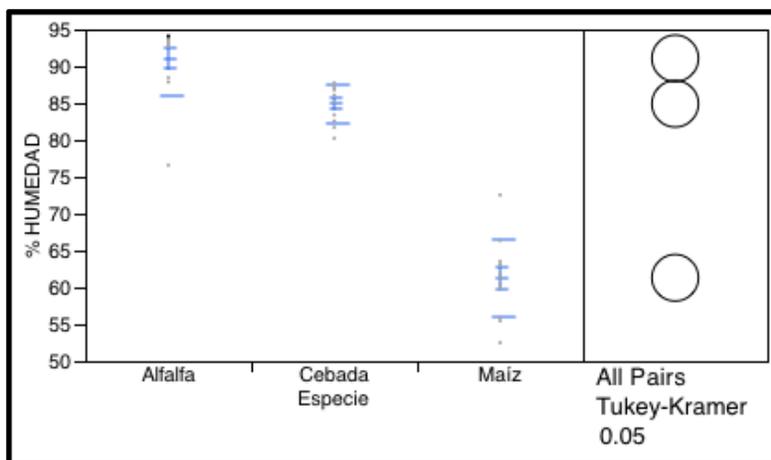


Figura 5.19. Gráfico ilustrativo del porcentaje de humedad en las muestras procesadas de la corrida #2 del experimento. Las diferencias significativas encontradas de acuerdo con la prueba de Tukey, se representan en la Figura del lado derecho.

5.2.4.1.2.4. Peso seco.

En cuanto a peso seco se tiene la mayor proporción en maíz con un promedio de 256.83 g, mientras que el contenido de materia seca en la alfalfa es de 180.83 g, la cebada se colocó entre ambos grupos con un valor de 205.83 g (Cuadro 5.5). Las diferencias entre grupos fueron significativas con respecto a la prueba de Tukey (Figura 5.20).

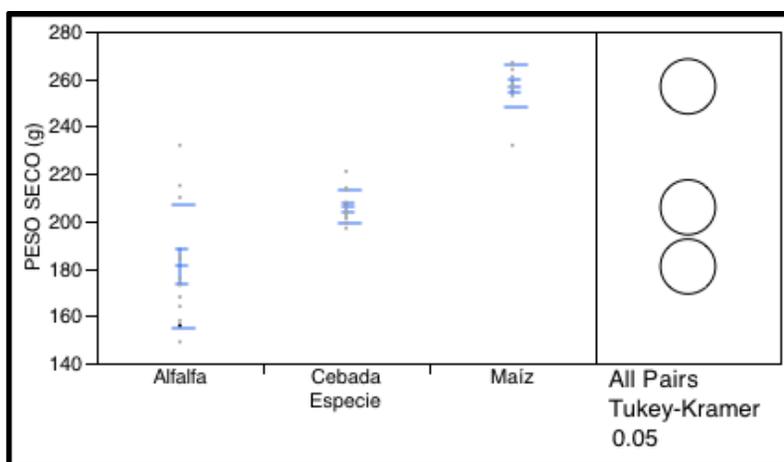


Figura 5.20. Distribución de los valores de peso seco registrados para las especies empleadas en la segunda corrida del experimento. A la derecha se muestran representados los diferentes grupos formados como resultado de la prueba de Tukey.

5.2.4.1.2.5. Porcentaje de materia seca.

El comportamiento de las diferentes especies en cuanto a materia seca es el mismo que en peso seco, ya que la composición del maíz resultó en un promedio de 38.69% de materia seca, mientras que en alfalfa solamente el 8.91% corresponde a dicha fracción (Cuadro 5.5). La cebada se mantuvo con valores intermedios de 15.08% de MS en promedio. Las diferencias vuelven a ser significativas entre grupos de acuerdo con la prueba de Tukey (Figura 5.21).

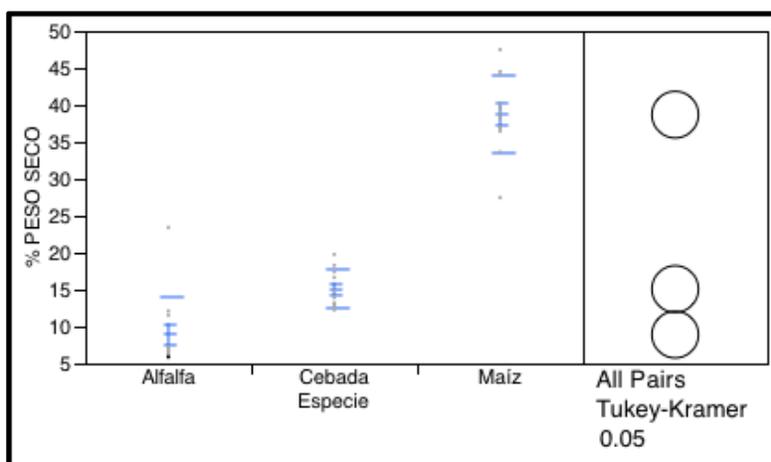


Figura 5.21. Representación de los estadísticos obtenidos de la corrida #2 para las diferentes especies en porcentaje de materia seca. Las diferencias significativas con respecto a la prueba de Tukey son ejemplificadas por la Figura de la derecha.

5.2.4.1.2.6. Índices de productividad.

La mayor productividad se obtuvo en maíz con 53.58 Kg MS/m²/año en promedio, en contraste con la menor de 37.72 Kg MS/m²/año observada en alfalfa. El comportamiento de los datos va de acuerdo con el de peso seco y el porcentaje de materia seca (Cuadro 5.5). Las diferencias continúan siendo significativas conforme a la prueba de Tukey (Figura 5.22).

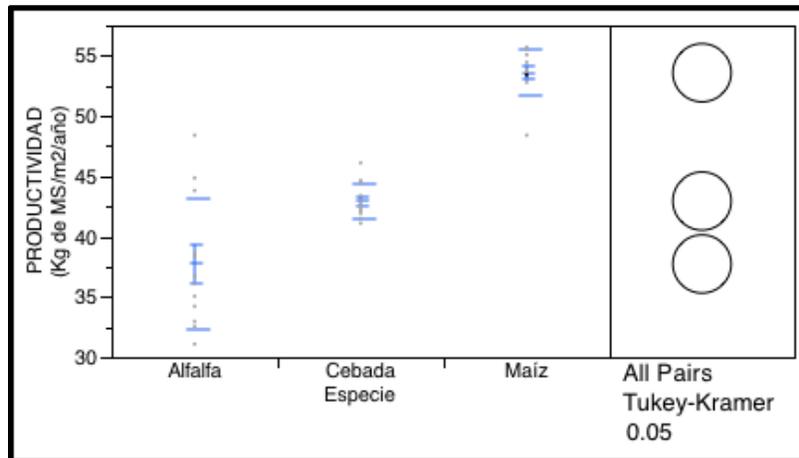


Figura 5.22. Productividad calculada a partir de los datos de peso seco de las especies evaluadas en la segunda corrida. El gráfico de la izquierda muestra la distribución de frecuencias, el de la derecha las diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey.

Los análisis estadísticos entre especies demostraron en ambas corridas que el maíz es la especie más productiva, ya que con ella se obtiene una mayor cantidad de materia seca con respecto a alfalfa y cebada, en el mismo periodo de cultivo. El segundo lugar en cuanto a productividad en la primera corrida, fue ocupado por la alfalfa, mientras que en la segunda corrida lo ocupó la cebada.

Esto se podría justificar con la demanda hídrica de cada especie, que de acuerdo al Cuadro 2.1, el maíz requiere de menos agua para la producción de materia seca que la cebada y la alfalfa.

5.2.4.2. Análisis comparativo por especie entre riegos.

5.2.4.2.1. Primera corrida.

5.2.4.2.1.1. Maíz.

Los mayores rendimientos son observados en el sistema hidropónico, ya que el maíz cosechado tiene una mayor altura y peso en fresco, sin embargo, también posee un mayor porcentaje de humedad. Los datos arrojados por los sistemas con riego acuapónico y mixto indican que se tiene una mayor productividad en cuanto a materia seca con respecto a los otros sistemas, ya que destacan con valores de 59.59 Kg de materia seca/m²/año y 59.03 Kg de materia seca/m²/año respectivamente, a diferencia de 58.34 Kg de materia seca/m²/año obtenidos en el riego control y 57.16 Kg de materia seca/m²/año para el sistema hidropónico (Cuadro 5.6).

Cuadro 5.6. Comparación de resultados en maíz entre las diferentes variables de respuesta para los sistemas de riego evaluados en la primera corrida. Los superíndices indican diferencias significativas entre los grupos con un valor $p < 0.05$ de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$).

PARÁMETRO	REGIO				F	P
	Acuapónico	Control	Hidropónico	Mixto		
Altura (cm)	6.8333 ^b ±0.6009	9.3333 ^{ab} ±0.8819	11.6667 ^a ±0.3333	10.3333 ^{ab} ±1.2019	6.1959	0.0176*
Peso húmedo (g)	524.000±30.827	566.667±19.055	610.333±12.667	543.667±18.460	3.0384	0.0928
% Humedad	45.0560±3.6337	50.5317±1.7280	55.0426±1.5939	47.8210±1.8555	3.2653	0.0803
Peso seco (g)	285.667±2.8480	279.667±0.8819	274.000±4.3589	283.000±1.0000	3.5013	0.0694
% Materia seca	54.9440±3.6337	49.4683±1.7280	44.9574±1.5939	52.1790±1.8555	3.2653	0.0803
Productividad (Kg MS/m ² /año)	59.5955±0.59415	58.3438±0.18398	57.1616±0.90935	59.0392±0.20862	3.5013	0.0694

5.2.4.2.1.1.1. Altura.

El mayor valor de altura fue de 12 cm, tanto para el riego hidropónico como para el mixto; el menor valor registrado fue de 6 cm, y corresponde al sistema acuapónico. Las diferencias entre los valores promedio calculados fueron significativas solamente para el sistema hidropónico y acuapónico (Figura 5.23).

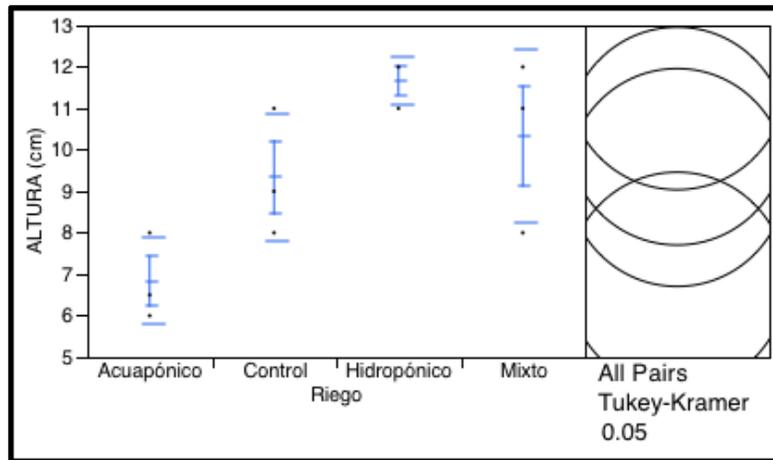


Figura 5.23. Gráfico representativo de datos de altura obtenidos en maíz con los diferentes riegos en la primera corrida y su diferencia significativa con respecto a la Prueba de Tukey.

5.2.4.2.1.1.2. Peso húmedo.

De acuerdo al Cuadro 5.6, no se encontraron diferencias significativas entre los datos de peso húmedo registrados para maíz en los riegos evaluados. El mayor valor promedio fue de 610.33 g para el riego hidropónico, mientras que el menor valor calculado fue de 524.00 g el sistema acuapónico.

5.2.4.2.1.1.3. Porcentaje de humedad.

Los mayores porcentajes de humedad fueron encontrados en el sistema hidropónico con un rango que va entre el 51.96% y 55.85%, a diferencia del acuapónico en el que los valores van del 39.66% al 51.97%. No obstante, las diferencias entre riegos para este parámetro, no son significativas (Cuadro 5.6).

5.2.4.2.1.1.4. Peso seco.

En cuanto a peso seco lo el promedio calculado es de 274.00 g para el riego hidropónico y 285.66 g para el acuapónico, nuevamente sin diferencias significativas (Cuadro 5.6).

5.2.4.2.1.1.5. Porcentaje de materia seca

El mayor valor en porcentaje de materia seca obtenido fue en el riego acuapónico con 54.94%, seguido del riego mixto con 52.17%. A pesar de que en

los otros riegos se presentaron porcentajes relativamente más bajos, las diferencias no son significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (Cuadro 5.6).

5.2.4.2.1.1.6. Índices de productividad.

No hay diferencias significativas de productividad (con respecto a la prueba de Tukey) entre los diferentes riegos, sin embargo el mayor valor es de 59.59 Kg de MS/m²/año y corresponde al riego acuapónico, en contraste con el hidropónico que fue el menor con 57.16 Kg de MS/m²/año (Cuadro 5.6).

5.2.4.2.1.2. Cebada.

En cuanto a la cebada se observó un comportamiento entre riegos muy parecido al maíz, ya que los mayores valores de altura obtenidos fueron para el riego hidropónico. En cuanto a peso húmedo y porcentaje de humedad, los valores más altos son para el riego control. Los rendimientos en cuanto a peso seco, % de materia seca y productividad continúan siendo más altos para los riegos acuapónico y mixto (Cuadro 5.7).

Cuadro 5.7. Datos estadísticos representativos para la cebada, derivados del análisis entre los diferentes riegos y los parámetros evaluados durante la primera corrida del experimento.

PARÁMETRO	RIEGO				F	P
	Acuapónico	Control	Hidropónico	Mixto		
Altura (cm)	15.6667±2.0276	19.1667±0.6009	21.6667±0.8819	19.3333±2.6667	1.9798	0.1957
Peso húmedo (g)	1256.33±314.77	1418.33±52.01	1308.00±153.83	1228.33±77.98	0.2137	0.8842
% Humedad	77.9008±7.9834	85.5190±0.6946	83.2032±3.0452	81.9293±1.5039	0.5379	0.6694
Peso seco (g)	230.333±17.704	204.667±2.404	210.333±9.404	219.667±4.485	1.1819	0.3759
% Materia seca	22.0992±7.9834	14.4810±0.6946	16.7968±3.0452	18.0707±1.5039	0.5379	0.6694
Productividad (Kg MS/m ² /año)	48.0519±3.6935	42.6974±0.5015	43.8796±1.9620	45.8267±0.9356	1.1819	0.3759

5.2.4.2.1.2.1. Altura.

Haciendo referencia al Cuadro 5.7, las diferencias de altura en cebada entre los sistemas de riego no son significativas. El valor más alto registrado fue de 23 cm en hidroponía, mientras que el más bajo fue de 12 cm para el riego acuapónico. El patrón de altura en cuanto a riego se repite nuevamente, ya que al igual que en el maíz se encontraron los mayores valores en el riego hidropónico y los menores en el riego acuapónico.

5.2.4.2.1.2.2. Peso húmedo.

En cuanto a peso húmedo no se observaron diferencias significativas (Cuadro 5.7), sin embargo, existe un rango de variación muy alto entre los valores registrados en el riego acuapónico que van desde los 1748 g hasta los 670 g, siendo el valor más alto y el más bajo reportados.

5.2.4.2.1.2.3. Porcentaje de humedad.

Los valores de porcentaje de humedad van desde el 77.90% en riego acuapónico hasta 85.51% en el control, sin diferencias significativas entre riegos (Cuadro 5.7).

5.2.4.2.1.2.4. Peso seco.

Los resultados de peso seco indican el mayor rendimiento en el sistema acuapónico con un promedio de 230.33 g; en cambio el sistema control reporta los valores más bajos con un promedio de 204.66 g. De acuerdo a la prueba de Tukey, no hay diferencias significativas entre riegos (Cuadro 5.7).

5.2.4.2.1.2.5. Porcentaje de materia seca.

Al igual que en el maíz, los mayores porcentajes de MS se observan en el riego acuapónico, seguido del mixto. El valor más alto fue de 22.09% (acuapónico) mientras que el menor fue de 14.48% (control), nuevamente no existen diferencias significativas (Cuadro 5.7).

5.2.4.2.1.2.6. Índices de productividad

La cebada, al igual que el maíz, resultó ser más productiva en los sistemas acuapónico y mixto con valores de 48.05 Kg de materia seca/m²/año y 45.82 Kg de materia seca/m²/año respectivamente, no obstante, tampoco se encontraron diferencias significativas entre riegos de acuerdo a la prueba de Tukey (Cuadro 5.7).

5.2.4.2.1.3. Alfalfa.

El comportamiento en general de la alfalfa (como leguminosa) con respecto a las otras especies (gramíneas) probadas en el experimento, fue contrastante. Los mayores valores de altura y porcentaje de humedad son observados en hidroponía, mientras que para peso húmedo el mayor valor se registró en promedio en el riego control. A pesar de que los datos sugieren el mayor valor promedio de peso seco para el mismo riego (control), el mayor porcentaje de MS obtenido fue en el riego mixto con 19.42%, sin embargo, el sistema más productivo resultó ser con el riego control, de acuerdo a los análisis estadísticos (Cuadro 5.8).

Cuadro 5.8. Estadísticos procedentes de los parámetros medidos en alfalfa en los diferentes riegos durante la primera corrida del experimento.

PARÁMETRO	RIEGO				F	P
	Acuapónico	Control	Hidropónico	Mixto		
Altura (cm)	6.83333±0.6009	7.00000±0.5774	9.66667±1.3333	7.33333±0.7265	2.3302	0.1507
Peso húmedo (g)	1546.33±181.35	1976.67±348.83	1768.33±173.40	1255.33±207.76	1.6770	0.2483
% Humedad	85.3470±1.9179	83.6999±0.7795	86.8280±1.2796	80.5772±3.0250	1.9076	0.2069
Peso seco (g)	220.333±12.414	317.000±43.616	231.000±25.146	231.333±3.180	3.0030	0.0949
% Materia seca	14.6530±1.9179	16.3001±0.7795	13.1720±1.2796	19.4228±3.0250	1.9076	0.2069
Productividad (Kg MS/m ² /año)	45.9657±2.5898	66.1323±9.0991	48.1910±5.2460	48.2606±0.6634	3.0030	0.0949

5.2.4.2.1.3.1. Altura.

Haciendo referencia al Cuadro 5.8 se tiene que el promedio más bajo corresponde al riego acuapónico con 6.83 cm, mientras que con el riego hidropónico se alcanzó una altura promedio de 9.66 cm. No obstante, las diferencias entre los sistemas de riego no fueron significativas de acuerdo con la prueba de Tukey.

5.2.4.2.1.3.2. Peso húmedo.

Los datos arrojados, muestran que el peso húmedo más alto obtenido corresponde al riego control con 2549 g, mientras que el más bajo fue para el riego mixto con 905 g. A pesar del amplio rango de datos registrados no hay diferencias significativas, esto podría justificarse con la variabilidad de los datos analizados para los cuatro riegos (Cuadro 5.8).

5.2.4.2.1.3.3. Porcentaje de humedad.

El rango de porcentaje de humedad registrado va desde un 80.57% en el riego mixto hasta un 86.82% en hidroponía, sin embargo en el primero se encontró una mayor variabilidad entre los datos. No se encontraron diferencias significativas para este parámetro de acuerdo con la prueba de Tukey (Cuadro 5.8).

5.2.4.2.1.3.4. Peso seco.

Para peso seco no hubo diferencias significativas entre los riegos, a pesar de que los mayores valores registrados, que corresponden al riego control alcanzaron en promedio los 317.00 g, mientras que en acuaponía el valor promedio calculado fue de 220.33 g (Cuadro 5.8).

5.2.4.2.1.3.5. Porcentaje de materia seca.

Para este parámetro tampoco hay diferencias significativas, no obstante el rango en promedio de porcentaje de materia seca va desde un 13.17% en el riego hidropónico, hasta un 19.42% para el riego mixto (Cuadro 5.8).

5.2.4.2.1.3.6. Índices de productividad

La productividad de la alfalfa arrojó datos un tanto diferentes con respecto a las otras especies, ya que a pesar de que se mantiene el hecho de que no hay diferencias significativas entre los riegos, el sistema más productivo fue el control, seguido del mixto y el hidropónico con valores bastante semejantes entre sí: el menos productivo fue el acuapónico (Cuadro 5.8).

5.2.4.2.2. Segunda corrida.

5.2.4.2.2.1. Maíz.

El maíz, al igual que en la primera corrida, resultó ser la especie con mayores rendimientos; en contraste, los resultados fueron favorecidos por el riego mixto, seguido del hidropónico; sin embargo, las diferencias entre grupos no fueron significativas para los parámetros evaluados, a excepción del peso húmedo, en el que se encontraron diferencias con un valor $p < 0.05$ entre riegos, siendo el acuapónico y mixto los que registraron mayor diferencia conforme a la prueba de Tukey, mientras que los riegos restantes resultaron dentro del mismo grupo. El sistema más productivo fue el mixto, el acuapónico por el contrario, fue el menos productivo (Cuadro 5.9).

Cuadro 5.9. Estadísticos calculados para las variables de respuesta evaluadas a partir de los datos registrados para maíz de la segunda corrida en relación con los riegos. Las diferencias significativas entre los grupos de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) con un valor resultante de $p < 0.05$ se representan con superíndices.

PARÁMETRO	RIEGO				F	P
	Acuapónico	Control	Hidropónico	Mixto		
Altura (cm)	12.3333±1.0138	11.6667±2.0276	13.0000±0.5000	11.8333±1.1667	0.2126	0.8849
Peso húmedo (g)	768.667 ^a ±40.134	663.000 ^{ab} ±35.233	648.333 ^{ab} ±2.906	613.000 ^b ±33.151	4.5326	0.0388*
% Humedad	67.3628±2.7475	60.6596±2.5952	60.5106±0.4022	56.6963±2.6939	3.6237	0.0645
Peso seco (g)	248.667±8.6474	259.000±2.5166	256.000±1.5275	263.667±2.8480	1.7298	0.2380
% Materia Seca	32.6372±2.7475	39.3404±2.5952	39.4894±0.4022	43.3037±2.6939	3.6237	0.0645
Productividad (Kg MS/m ² /año)	51.8766±1.8040	54.0324±0.5250	53.4065±0.3187	55.0059±0.5941	1.7298	0.2380

5.2.4.2.2.1.1. Altura.

Los datos de altura muestran los mayores valores en promedio en el sistema hidropónico con 13.00 cm, a diferencia del riego control que muestra el menor valor con 11.66 cm en promedio (Cuadro 5.9). Las diferencias no fueron significativas con respecto a la prueba de Tukey.

5.2.4.2.2.1.2. Peso húmedo.

De los parámetros evaluados, el peso húmedo en maíz fue el único que presentó diferencias significativas con respecto a la prueba de Tukey, ya que el valor p obtenido en el análisis fue <0.0388 (Figura 5.24). En promedio el riego que registró mayor peso húmedo fue el acuapónico con 768.66 g, a comparación del mixto que resultó ser el menor con 613.00 g (Cuadro 5.9).

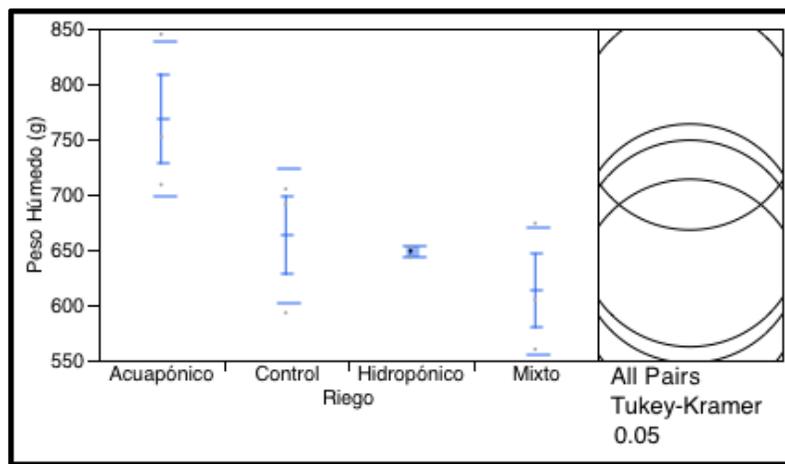


Figura 5.24. Distribución de los datos resultantes de la segunda corrida en cuanto a peso húmedo de maíz en los diferentes riegos. La gráfica del costado derecho representa las diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey.

5.2.4.2.2.1.3. Porcentaje de humedad.

De igual manera, el porcentaje de humedad tuvo un mayor resultado en el riego acuapónico con un 67.36%, mientras que el menor porcentaje fue encontrado en el sistema mixto con 56.69% (Cuadro 5.9). Curiosamente a pesar de que en peso húmedo las diferencias fueron significativas, para el porcentaje de humedad no lo son.

5.2.4.2.2.1.4. Peso seco.

En concordancia con los análisis anteriores, el mayor contenido de materia seca fue registrado en el sistema mixto con un valor promedio de 263.66 g de peso seco, mientras que en el acuapónico se obtuvo un promedio de 248.66 g (Cuadro 5.9). Nuevamente hay ausencia de diferencias significativas con respecto a la prueba de Tukey.

5.2.4.2.2.1.5. Porcentaje de materia seca.

En cuanto a porcentaje de materia seca los resultados mínimos y máximos van de acuerdo con los de peso seco, encontrados en el riego acuapónico y mixto respectivamente, con valores promedio de 32.63% y 43.30% (Cuadro 5.9). No existen diferencias significativas.

5.2.4.2.2.1.6. Índices de productividad.

El sistema más productivo fue el mixto con 55.00 Kg MS/m²/año, contrario al acuapónico, en el que los valores calculados fueron los menores con un promedio de 51.87 Kg MS/m²/año. Las diferencias en cuanto a productividad no fueron significativas conforme a la prueba de Tukey (Cuadro 5.9).

5.2.4.2.2.2. Cebada.

Los resultados para cebada son un poco variables en cuanto a altura y peso húmedo a comparación de los demás parámetros evaluados, ya que los mayores valores de altura y porcentaje de humedad corresponden al riego mixto, mientras que el mayor promedio de peso húmedo fue encontrado en el sistema control. Las demás variables evaluadas (peso seco (g), porcentaje de materia seca y productividad) muestran una relación proporcional ya que en las tres sobresale el sistema hidropónico de entre los demás (Cuadro 5.10).

Cuadro 5.10. Variables evaluadas durante la corrida #2 del experimento en cebada contra los diferentes riegos.

PARÁMETRO	RIEGO				F	P
	Acuapónico	Control	Hidropónico	Mixto		
Altura (cm)	17.8333±0.1667	18.6667±0.9280	19.8333±1.6415	21.1667±0.6009	2.1291	0.1747
Peso húmedo (g)	1361.67±123.32	1426.67±130.85	1375.67±150.43	1409.67±87.91	0.0573	0.9807
% Humedad	84.5562±1.6118	85.3233±1.8047	84.3595±2.1984	85.4238±1.0325	0.0979	0.9590
Peso seco (g)	206.333±4.9777	204.667±4.2557	208.667±6.2272	203.667±1.2019	0.2299	0.8730
% Materia Seca	15.4438±1.6118	14.6767±1.8047	15.6405±2.1984	14.5762±1.0325	0.0979	0.9590
Productividad (Kg MS/m²/año)	43.0451±1.0384	42.6974±0.8878	43.5319±1.2991	42.4888±0.2507	0.2299	0.8730

5.2.4.2.2.2.1. Altura.

El mayor valor promedio de altura lo tiene el sistema mixto con 21.16 cm, mientras que el acuapónico registró el menor valor con 17.83 cm (Cuadro 5.10). El rango de variación de los datos está ubicado entre los 17.5 y los 23 cm. De acuerdo con la prueba de Tukey no existen diferencias significativas de altura entre los riegos.

5.2.4.2.2.2.2. Peso húmedo.

El sistema que obtuvo un mayor valor de peso húmedo fue el control con 1426.67 g, contrastando con el menor valor de 1361.67 g registrado en el riego acuapónico (Cuadro 5.10). No hubo diferencias significativas entre los riegos.

5.2.4.2.2.2.3. Porcentaje de humedad.

De acuerdo con los cálculos realizados, el mayor porcentaje de humedad corresponde al sistema mixto con 85.42%, mientras que el menor valor es para el riego hidropónico con 84.35% en promedio (Cuadro 5.10). Nuevamente hay ausencia de diferencias significativas entre sistemas conforme a la prueba de Tukey.

5.2.4.2.2.2.4. Peso seco.

Los resultados de peso seco muestran que el sistema hidropónico sobresale de entre los demás con 208.66 g. El menor valor corresponde al sistema

mixto con 203.66 g (Cuadro 5.10). La prueba de Tukey arrojó un valor de p de 0.8730, por lo que no hay diferencias significativas.

5.2.4.2.2.5. Porcentaje de materia seca.

El comportamiento del porcentaje de materia seca no muestra diferencias significativas y acorde con el peso seco, el sistema hidropónico obtuvo el promedio más alto con 15.64%, mientras que el menor corresponde al mixto con 14.57% (Cuadro 5.10).

5.2.4.2.2.6. Índices de productividad.

El sistema más productivo para cebada es el hidropónico con 43.53 Kg MS/m²/año contra el mixto que resultó ser el menos productivo con 42.48 Kg MS/m²/año (Cuadro 5.10). No existen diferencias significativas entre los riegos conforme a la prueba de Tukey.

5.2.4.2.2.3. Alfalfa.

Los datos de alfalfa muestran los mayores rendimientos en cuanto a altura, peso seco, porcentaje de materia seca y productividad, en el sistema mixto, no obstante, los valores para el resto de los parámetros, es decir, para peso húmedo y porcentaje de humedad, son mayores en el sistema acuapónico. No hubo diferencias significativas entre las variables evaluadas contra los riegos respecto a la prueba de Tukey (Cuadro 5.11).

Cuadro 5.11. Estadísticos calculados en las muestras de alfalfa para las diferentes variables de respuesta en los cuatro sistemas de producción evaluados durante la segunda corrida del experimento.

PARÁMETRO	RIEGO				F	P
	Acuapónico	Control	Hidropónico	Mixto		
Altura (cm)	10.0000±0.5774	10.5000±0.7638	10.6667±0.1667	11.3333±1.1667	0.5261	0.6766
Peso húmedo (g)	2613.00±18.00	2315.67±292.88	2241.33±211.88	1946.33±477.73	0.8351	0.5114
% Humedad	93.8495±0.1717	91.5020±1.8165	91.5988±1.5732	87.3973±5.4040	0.8257	0.5157
Peso seco (g)	160.667±3.712	186.333±13.296	182.667±19.064	193.667±19.186	0.8748	0.4934
% Materia Seca	6.1505±0.1717	8.4980±1.8165	8.4012±1.5732	12.6027±5.4040	0.8257	0.5157
Productividad (Kg MS/m ² /año)	33.5181±0.7744	38.8727±2.7738	38.1078±3.9772	40.4026±4.0026	0.8748	0.4934

5.2.4.2.2.3.1. Altura.

La mayor altura registrada en promedio fue de 11.33 cm con el sistema mixto, mientras que el menor valor pertenece al riego acuapónico con 10.00 cm (Cuadro 5.11). No hubo diferencias significativas para altura del FVH entre riegos.

5.2.4.2.2.3.2. Peso húmedo.

El sistema acuapónico tuvo el mayor peso húmedo con un promedio de 2613.00 g, contrastando con 1946.33 g obtenidos con el riego mixto (Cuadro 5.11). Sin embargo, el análisis por medio de la prueba de Tukey reiteró que no existen diferencias significativas entre los sistemas.

5.2.4.2.2.3.3. Porcentaje de humedad.

Los resultados de porcentaje de humedad concuerdan con los de peso húmedo, ya que el riego acuapónico sobresale con el 93.84% mientras que el mixto obtuvo el menor valor con 87.39%. El estrecho rango entre valores mostró ausencia de diferencias significativas (Cuadro 5.11).

5.2.4.2.2.3.4. Peso seco.

El riego mixto destaca de entre los demás con un valor en promedio de 193.66 g de peso seco, el menor valor obtenido es para el sistema acuapónico con 160.66 g registrados (Cuadro 5.11). La prueba de Tukey no reveló diferencias significativas entre grupos.

5.2.4.2.2.3.5. Porcentaje de materia seca.

Nuevamente para materia seca se obtuvieron los mayores valores en el sistema mixto con 12.60%, mientras que el acuapónico manifestó el menor porcentaje que corresponde a poco menos de la mitad del mixto, es decir, al 6.15% (Cuadro 5.11). A pesar de las diferencias encontradas, la prueba de Tukey manifestó que no son significativas con un valor $p > 0.05$.

5.2.4.2.2.3.6. Índices de productividad.

Los cálculos de productividad reiteran que el sistema más productivo es el mixto con valores de 40.40 Kg MS/m²/año, sin embargo, no se obtuvieron

diferencias significativas, siendo el menor valor correspondiente al riego acuapónico con 33.51 Kg MS/m²/año (Cuadro 5.11).

Los resultados del análisis comparativo por especie entre riegos demuestra que no existen diferencias significativas para las variables de respuesta analizadas (altura, peso húmedo, porcentaje de humedad, peso seco, porcentaje de materia seca y productividad) entre los cuatro sistemas: control, hidropónico, acuapónico y mixto; a excepción de la altura en maíz en la primera corrida, en la que existen diferencias significativas entre riegos de acuerdo a la prueba de Tukey con un valor de p de 0.0176 ($\alpha=0.05$). No obstante, la altura no es un parámetro confiable para definir si un sistema es productivo o no, ya que en el mismo caso del maíz se pudo observar que a pesar de que en el riego acuapónico se obtuvieron los menores valores de altura, la proporción en cuanto a peso seco fue la más alta.

En los análisis de la segunda corrida solamente se encontraron diferencias significativas entre los riegos en cuanto a peso húmedo en maíz, sin embargo, este parámetro tampoco puede definir la productividad de un sistema, ya que a pesar de que se obtuvo el mayor promedio de peso húmedo en el riego acuapónico, hablando de peso seco la mayor proporción fue para el riego control.

Cabe destacar que en la primera corrida del experimento se obtuvieron los mayores rendimientos en cuanto a productividad en el riego acuapónico, seguido del mixto, tanto en maíz como en cebada; mientras que en la segunda corrida los riegos sobresalientes fueron el mixto (maíz y alfalfa) y el hidropónico (cebada), sin embargo, no hubo diferencias significativas en términos de productividad, entre los sistemas evaluados, en ninguna de las dos corridas.

La especie más productiva en ambas corridas resultó ser el maíz, ya que obtuvo los mayores valores de materia seca por metro cuadrado por año.

En el Cuadro 5.12 se presentan algunos datos comparativos de productividad (Toneladas de Materia Seca/hectárea/año) entre un sistema

convencional de producción de forraje (a campo abierto) y varios estudios realizados sobre FVH, así como la relación de cantidad de semilla utilizada para la siembra en los diferentes sistemas.

Cuadro 5.12. Comparación de productividad promedio y cantidad de semilla calculadas en diferentes sistemas de producción. ¹ (Urbano D, 2003); ² (Carr PM, 1998); ³ (Lauer JG, 2001).

Especie	Productividad Ton MS/Ha/año				Kg de semilla/m ² /año			
	Producción en sistema Convencional	Producción de FVH			Producción en sistema Convencional	Producción FVH		
		Este trabajo	(Al-Karaki <i>et al.</i> , 2012)	(López-Aguilar <i>et al.</i> , 2009)		Este trabajo	(Al-Karaki <i>et al.</i> , 2012)	(López-Aguilar <i>et al.</i> , 2009)
Alfalfa	16-20 ¹	521.33	725.43	ND	ND	67.83	11.17	ND
Cebada	8-2 ²	450.93	1551.25	ND	ND	69.96	16.79	ND
Maíz	12-24 ³	585.34	ND	46.2	ND	71.76	ND	65.17

El Cuadro 5.12 muestra que un sistema de producción de FVH es mucho más eficiente que el sistema convencional (sin considerar la cantidad de semilla sembrada, debido a que no se tienen datos al respecto en el sistema convencional), ya que aún en el sistema de FVH menos productivo (López-Aguilar *et al.*, 2009) se reportan 46.2 Ton MS/Ha/año en maíz, casi el doble de producción media a campo abierto, que reportó un rango entre 12-24 Ton MS/Ha/año. La productividad promedio de los sistemas evaluados en este trabajo revela un valor mayor que el sistema experimental probado por López y colaboradores en el 2009 para maíz; sin embargo, comparando contra un sistema mucho más eficiente como el de Al-Karaki y colaboradores, se obtuvieron rendimientos de poco más de la mitad de los reportados para alfalfa. En cuanto a cebada, el rendimiento alcanzado por Al-Karaki y colaboradores es poco más de 3 veces mayor que el obtenido en este trabajo (Cuadro 5.12), lo que sugiere la optimización del proceso de producción, considerando una menor densidad de siembra, un uso más eficiente del recurso hídrico, así como mejoras en el invernadero con el fin de mantener las condiciones climáticas lo más cercano posible a los rangos óptimos de producción.

Es importante tomar en cuenta el Uso Eficiente del Agua (UEA), ya que este factor repercute directamente tanto en la producción como en los costos de operación. El Cuadro 5.13 muestra una comparación de la productividad de diversos sistemas que consideran este factor.

Cuadro 5.13. Tabla comparativa del Uso Eficiente del Agua (UEA) en diferentes sistemas de producción. ⁴ (Jefferson PG, 2005); ⁵ (Azooz RH, 1998); ⁶ (Howell TA, 1998)

Especie	Uso Eficiente del Agua (UEA) Kg MS/m ³			
	Producción en sistema Convencional	Producción FVH		
		Este trabajo	(Al-Karaki <i>et al.</i> , 2012)	(López-Aguilar <i>et al.</i> , 2009)
Alfalfa	1.59-2.10 ⁴	8.519	43	ND
Cebada	0.36-0.67 ⁵	7.369	110	ND
Maíz	2.75-2.88 ⁶	9.565	ND	0.114

Los datos de UEA reportados muestran que el sistema más eficiente en cuanto al uso del agua es el reportado por Al-Karaki y colaboradores en el 2011, ya que ellos sólo toman en cuenta el agua asimilada por la planta mientras que en este trabajo se consideró la demanda hídrica de acuerdo a pruebas previamente realizadas en el invernadero, la cual incluye tanto el agua asimilada como el agua drenada del riego. Cabe destacar que en este trabajo los riegos se ajustaron a las condiciones climáticas del invernadero.

5.2.5. Costos de producción.

5.2.5.1. Sistema hidropónico.

Si el invernadero de FVH se mantuviera en producción constante durante todo el año (considerando 30.416 ciclos) con las tres especies que fueron evaluadas en este trabajo (Alfalfa, cebada y maíz), los costos anuales de producción en el sistema hidropónico serían de 186,897.54 pesos mexicanos, y el costo por kilo de forraje en fresco sería de \$12.88, de acuerdo con los resultados descritos en el Cuadro 5.14.

Cuadro 5.14. Costos de producción de FVH para el sistema con riego hidropónico.

CONCEPTO	PROYECCIÓN ANUAL PARA PRODUCCIÓN DE FVH
GASTOS INDIRECTOS	\$ 900.00
INVERSIÓN FIJA DE MATERIALES Y EQUIPO	\$ 35,896.39
COSTO POR DEPRECIACIÓN DE LA INVERSIÓN	\$ 5,962.89
INVERSIÓN NO FIJA	\$ 7,499.77
MANO DE OBRA	\$ 49,535.71
INSUMOS	\$ 122,999.16
GRAN TOTAL	\$ 222,793.93
	\$ 35,896.39 INVERSIÓN FIJA
COSTOS DE PRODUCCIÓN ANUALES	\$ 186,897.54
PRECIO POR KG (PESO FRESCO)=	\$ 12.88

5.2.5.2. Sistema mixto.

En cuanto al sistema mixto, se calcularon costos de producción anuales de 186,612.38 pesos mexicanos, que corresponden a un costo unitario por kilo de forraje verde de \$14.62 (Cuadro 5.15).

Cuadro 5.15. Costos de producción de forraje verde para el sistema mixto.

CONCEPTO	PROYECCIÓN ANUAL PARA PRODUCCIÓN DE FVH
GASTOS INDIRECTOS	\$ 900.00
INVERSIÓN FIJA DE MATERIALES Y EQUIPO	\$ 35,896.39
COSTO POR DEPRECIACIÓN DE LA INVERSIÓN	\$ 5,962.89
INVERSIÓN NO FIJA	\$ 7,499.77
MANO DE OBRA	\$ 49,535.71
INSUMOS	\$ 122,714.00
GRAN TOTAL	\$ 222,508.76
	\$ 35,896.39 INVERSIÓN FIJA
COSTOS DE PRODUCCIÓN ANUALES	\$ 186,612.38
PRECIO POR KG (PESO FRESCO)=	\$ 14.62

5.2.5.3. Sistema acuapónico.

Para el sistema acuapónico los costos anuales fueron los más bajos, a comparación de los otros sistemas, con un total de \$184,824.42. Sin embargo, el costo unitario por kilo no fue el menor (Cuadro 5.16).

Cuadro 5.16. Costos de producción de FVH para el sistema acuapónico.

CONCEPTO	PROYECCIÓN ANUAL PARA PRODUCCIÓN DE FVH
GASTOS INDIRECTOS	\$ 900.00
INVERSIÓN FIJA DE MATERIALES Y EQUIPO	\$ 35,896.39
COSTO POR DEPRECIACIÓN DE LA INVERSIÓN	\$ 5,962.89
INVERSIÓN NO FIJA	\$ 7,499.77
MANO DE OBRA	\$ 49,535.71
INSUMOS	\$ 120,926.04
GRAN TOTAL	\$ 220,720.81
	\$ 35,896.39 INVERSIÓN FIJA
COSTOS DE PRODUCCIÓN ANUALES	\$ 184,824.42
PRECIO POR KG (PESO FRESCO)=	\$ 12.55

5.2.5.4. Sistema control.

El costo por kilo de forraje verde producido en el sistema control fue el más bajo y corresponde a \$12.11, el resultado del cálculo de costos anuales fue de \$184,984.84 (Cuadro 5.17).

Cuadro 5.17. Costos de producción de forraje verde en el sistema control.

CONCEPTO	PROYECCIÓN ANUAL PARA PRODUCCIÓN DE FVH
GASTOS INDIRECTOS	\$ 900.00
INVERSIÓN FIJA DE MATERIALES Y EQUIPO	\$ 35,896.39
COSTO POR DEPRECIACIÓN DE LA INVERSIÓN	\$ 5,962.89
INVERSIÓN NO FIJA	\$ 7,499.77
MANO DE OBRA	\$ 49,535.71
INSUMOS	\$ 121,086.46
GRAN TOTAL	\$ 220,881.22
	\$ 35,896.39 INVERSIÓN FIJA
COSTOS DE PRODUCCIÓN ANUALES	\$ 184,984.84
PRECIO POR KG (PESO FRESCO)=	\$ 12.11

El costo de producción anual más bajo fue el del sistema acuapónico, que tuvo una diferencia de \$2,073.12 con respecto al sistema hidropónico que resultó ser el más costoso. En cuanto a precios unitarios el más bajo se obtuvo en el sistema control y fue de \$12.11, en contraste con el más alto que fue de \$14.62 en el sistema mixto. Los costos unitarios fueron calculados a partir de la productividad de los diferentes sistemas en cuanto a peso fresco (ya que el FVH se vendería en peso fresco) por lo que los valores monetarios calculados son bastante relativos, ya que dependen de la humedad contenida en el forraje (la cual puede ser muy variable).

El desglose de los conceptos considerados en los costos de producción se muestra en los Cuadros 7.1 a 7.6 de la sección de Anexos.

Con el riego acuapónico los costos de producción anuales se ven atenuados debido principalmente a la reducción de insumos como el agua y fertilizantes, no obstante, es evidente que para reducir los gastos habría que considerar principalmente las especies a utilizar para la producción, ya que el costo de las semillas puede encarecer enormemente el precio unitario del producto, como resultó ser el caso de la alfalfa, ya que para su producción anual se requiere de una inversión de \$83,037.50 en semilla, lo cual corresponde aproximadamente al 44.6% del promedio de los costos anuales en los diferentes sistemas.

Si no se considerara la alfalfa para la producción de FVH, es decir, si nada más tomamos en cuenta la cebada y el maíz para producir forraje verde, el precio por kilo disminuiría en un 25% aproximadamente. Aún considerando esta disminución en el precio, comparando con los resultados de otros trabajos como los descritos en el Cuadro 5.18, el costo unitario es bastante más alto, esto puede deberse a varios factores:

1. Cada autor considera conceptos diferentes dentro del costo unitario, por ejemplo, en el manual de Soluciones Prácticas (2011) solamente incluyen conceptos como la semilla, una lona de cubierta para la germinación, agua de riego y mano de obra, mientras que en este trabajo

se considera la estructura del invernadero con depreciación a 10 años, el sistema de riego, entre otros conceptos que aparecen detallados en el desglose ubicado en la sección de Anexos (Cuadros 7.1 a 7.5).

2. El área de cada invernadero es diferente por lo que quizás la unidad experimental empleada para este experimento podría ser mucho más productiva si se aprovechara al máximo el espacio.
3. Las condiciones climáticas en el invernadero son de suma importancia ya que la productividad del sistema puede verse seriamente afectada.
4. Los costos de los insumos pueden ser bastante variables dependiendo de la zona de producción.
5. Algunas de las instalaciones de recintos de producción de FVH consideradas por los autores son rústicas, es decir, que utilizan materiales reciclados lo que reduce en gran medida los costos de producción (FAO, 2001).

Cuadro 5.18. Precios unitarios por kilo de forraje verde de cebada producido de acuerdo a varios autores.

***NOTA:** El costo presentado para este trabajo es el precio unitario mínimo calculado si se produjera exclusivamente cebada, en el sistema control; ambas opciones son las más redituables.

Concepto	(Romero Valdez et al., 2009)	(Álvarez et al., 2011)	(Álvarez A, 2009)	Este trabajo
Precio Unitario por Kg de FVH de Cebada	\$1.09	1 nuevo sol = \$5.01 (pesos mexicanos)	\$3.40	\$6.72*

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos ponen en duda el hecho de que el sistema de producción de forraje verde con riego hidropónico sea el más productivo en cuanto a peso seco, con lo que la hipótesis resulta ser aceptada. Sin embargo, las diferencias entre riegos no fueron significativas para los parámetros evaluados, por lo que el sistema de producción de forraje verde acuapónico se podría considerar como una alternativa viable, con una productividad igual o ligeramente mayor a la del sistema hidropónico (dependiendo de la especie), considerando la producción de forraje verde acuapónico como una alternativa no sólo productiva sino sustentable, ya que implicaría un mejor manejo de los recursos (agua y suelo principalmente) reduciendo el uso de fertilizantes y por ende el impacto ambiental, lo que además genera un efecto positivo en cuanto a costos de producción, mejorando la relación costo beneficio.

Algunas de las desventajas aunadas a este sistema de riego (acuapónico) es la cantidad de sólidos suspendidos totales en el agua proveniente del cultivo acuícola que llegan a obstruir tuberías y/o aspersores, quizás lo más conveniente en este caso sería probar algún tipo de filtro, biofiltro u otro tipo de aspersores.

En cuanto al sistema mixto, se esperaban rendimientos muy similares a los del riego hidropónico debido al balance en cuanto a contenido de nutrientes; aunque un poco menores a razón de las condiciones de calidad del agua y parámetros fisicoquímicos como pH y C.E. los cuales no eran los más adecuados para el cultivo. A pesar de ello, fue el sistema más sobresaliente (en dos de las especies) durante la segunda corrida del experimento, sin embargo, en la primera corrida el sistema de riego que destacó fue el acuapónico (igualmente en dos de las especies) a pesar de sus condiciones inadecuadas de pH y C.E., lo que es aún mejor porque esto comprueba que no se requiere agregar nutrientes químicos al agua para obtener buenos rendimientos y con ello se podría desarrollar un sistema alternativo de producción de forraje verde orgánico.

Este tema deja una puerta abierta no sólo respecto al desarrollo de nuevas alternativas de producción de alimento para ganado más sustentables,

sino también a la investigación sobre los posibles fenómenos químicos y biológicos que se llevan a cabo en este tipo de sistemas (acuapónicos), ya que, como sabemos, existen relaciones simbióticas a nivel macro y micro entre los diversos organismos que los componen, mismas que seguramente fueron responsables de la obtención de los mejores rendimientos tanto en el sistema acuapónico como en el mixto.

7. ANEXOS



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Química
Unidad de Servicios Químicos (USQ)

Santiago de Querétaro, Qro., Septiembre 25, 2012

INFORME DE RESULTADOS 378

CLIENTE:
 DIRECCION
 RECEPCIÓN DE LA MUESTRA:
 TIPO DE MUESTRA:
 MUESTRA TOMADA POR:
 No. DE FOLIO:

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
 UAQ CAMPUS AMAZCALA
 AGOSTO 22, 2012.
 Agua de peces
 Cliente.
 12SEP882

El resultado del análisis de agua de la muestra de agua de peces son los siguientes:

PARÁMETROS	RESULTADO (12SEP882)	UNIDADES
Calcio	15,02	mg/L
Magnesio	0,0862	mg/L
Fierro	<0,0201	mg/L
Manganeso	<0,0107	mg/L
Cobre	<0,062	mg/L
Zinc	<0,045	mg/L

NMX-AA-051-SCFI-2001 Análisis de agua - determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

ATENTAMENTE
 "EDUCO EN LA VERDAD Y EN EL HONOR"

QFB. CHRISTIAN JOVANNY VALENCIA GUZMAN
 JEFE DE LABORATORIO

TLC. JOSUE MARTINEZ RAMIREZ
 ANALISTA RESPONSABLE

Centro Universitario
 Cerro de las Campanas
 Santiago de Querétaro
 Qro., México
 C.P. 76010
 Tel. 01 (442) 192 12 00
 Ext. 5517
 Tel. Fax 242 05 50

Cualquier aclaración respecto a los resultados favor de comunicarse dentro de los siguientes 5 días hábiles.
 El (los) resultados de este informe corresponden exclusivamente a la(s) muestra(s) recibida(s) y analizada(s),
 cuyo origen es responsabilidad del cliente.

Página 1 de 1

Este informe podrá ser reproducido parcial o totalmente sólo con la autorización de la USQ

Figura 7.1. Análisis de microelementos en el agua proveniente del cultivo acuícola.

Cuadro 7.1. Desglose de los costos de producción de los diferentes sistemas.

***NOTA: los conceptos que se presentan en el Cuadro fueron iguales para los cuatro sistemas.**

	Tipo de insumos	Conceptos	Presentación	Cantidad	Costo unitarios	I.V.A.	Sub-Total	Total	Depreciación anual	
Inversión fija	Estructura del invernadero	Construcción del invernadero (v.u.=10 años)	-	44.5	\$ 300.00	\$ 0.00	\$ 13,350.00	\$ 13,350.00	\$ 1,335.00	
		Estructura para la producción de FVH (v.u.=10 años)	-	2	\$ 2,500.00	\$ 0.00	\$ 5,000.00	\$ 5,000.00	\$ 500.00	
		Bombas Siemens 1.0 hp (0.746 kw/h) (v.u.=5 años)	Pza	2	\$ 1,185.34	\$ 189.65	\$ 2,370.68	\$ 2,749.99	\$ 550.00	
		Tinacos 1100 l (v.u.=5 años)	Pza	2	\$ 1,437.93	\$ 230.07	\$ 2,875.86	\$ 3,336.00	\$ 667.20	
		Equipo de control de riegos (v.u.=10 años)	Pza	1	\$ 3,360.00	\$ 537.60	\$ 3,360.00	\$ 3,897.60	\$ 389.76	
		Equipo Datalogger 1000 Series (v.u.=3 años)	Pza	1	\$ 4,338.25	\$ 0.00	\$ 4,338.25	\$ 4,338.25	\$ 1,446.08	
		Sensor de Radiación solar (v.u.=3 años)	Pza	1	\$ 3,224.55	\$ 0.00	\$ 3,224.55	\$ 3,224.55	\$ 1,074.85	
								TOTAL	\$ 35,896.39	\$ 5,962.89
	Inversión no fija		Tubería de PVC 1"	Tamos de 6m	4	\$ 42.68	\$ 6.83	\$ 170.72	\$ 198.04	
		Codos 1"	Pza	18	\$ 3.67	\$ 0.59	\$ 66.06	\$ 76.63		
		Pegamento PVC (1/4 l)	Pza	1	\$ 68.00	\$ 10.88	\$ 68.00	\$ 78.88		
		T s 1"	Pza	7	\$ 4.43	\$ 0.71	\$ 31.01	\$ 35.97		
		Filtros 120 mesh 1"	Pza	2	\$ 108.70	\$ 17.39	\$ 217.40	\$ 252.18		
		Reducciones de 1 1/2" a 1"	Pza	6	\$ 4.90	\$ 0.78	\$ 29.40	\$ 34.10		
		Reducciones de 1 1/4" a 1"	Pza	2	\$ 4.40	\$ 0.70	\$ 8.80	\$ 10.21		
		Válvulas globo 1"	Pza	8	\$ 104.35	\$ 16.70	\$ 834.80	\$ 968.37		
		Tuercas unión de 1"	Pza	4	\$ 21.10	\$ 3.38	\$ 84.40	\$ 97.90		
		Cople macho 1"	Pza	6	\$ 3.22	\$ 0.52	\$ 19.32	\$ 22.41		
		Cople hembra 1"	Pza	4	\$ 2.85	\$ 0.46	\$ 11.40	\$ 13.22		
		Tapones 1"	Pza	2	\$ 2.85	\$ 0.46	\$ 5.70	\$ 6.61		
		Mini válvulas 16mm	Pza	10	\$ 14.70	\$ 2.35	\$ 147.00	\$ 170.52		
		Manguera ciega de 16mm	m	60	\$ 4.95	\$ 0.79	\$ 297.00	\$ 344.52		
		Cantillas de plástico	bolisa 100 pza	2	\$ 13.00	\$ 2.08	\$ 26.00	\$ 30.16		
		Malla sombra 50%	m	50	\$ 66.38	\$ 10.62	\$ 3,319.00	\$ 3,850.04		
		Boquilla para Nebulizador Tomado	pza	100	\$ 2.60	\$ 0.00	\$ 260.00	\$ 280.00		
		Nebulizador Tomado John Deere	Pza	100	\$ 10.50	\$ 0.00	\$ 1,050.00	\$ 1,050.00		
							TOTAL	\$ 7,499.77		
Mano de obra			Producción	semana	52.1429	\$ 950.00	\$ 0.00	\$ 49,535.71	\$ 49,535.71	
							TOTAL	\$ 49,535.71		
Gastos indirectos		Mano de obra cambio de plasticos (2 dias x persona)	día	4	\$ 150.00	\$ 0.00	\$ 600.00	\$ 600.00		
		Mano de obra instalación hidraulica	día	2	\$ 150.00	\$ 0.00	\$ 300.00	\$ 300.00		
							TOTAL	\$ 900.00		

Cuadro 7.2. Insumos utilizados en el sistema hidropónico.

CONCEPTO	Insumos	Presentación	Cantidad	Costo unitarios	I.V.A.	Sub-Total	Total por sistema (en el experimento)	Total por 360 charolas (ciclo real) ^p	Costos anuales
FERTILIZANTES POR CICLO ^a	Fosfato monoamónico MAP (kg)	25kg	0.032	\$ 19.80			\$ 0.63	\$ 12.67	\$ 385.44
	Multí Cal GG (CaNO ₃) Kg	25kg	0.06	\$ 8.90			\$ 0.53	\$ 10.68	\$ 324.85
	Muri K (KNO ₃) kg	25kg	0.06	\$ 18.55			\$ 1.11	\$ 22.26	\$ 677.08
	Nitrato de Magnesio (kg)	25kg	0.064	\$ 9.50			\$ 0.61	\$ 12.16	\$ 369.87
	Sulfato de magnesio (kg)	50 kg	0.068	\$ 3.70			\$ 0.25	\$ 5.03	\$ 153.06
	Ac. Borico (gr)	20 kg	0.0012	\$ 0.03			\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.02
	Quelato de Hierro 13%	1 kg	0.016	\$ 0.18			\$ 0.00	\$ 0.06	\$ 1.75
	Quelato de Manganeso 13%	1 kg	0.003	\$ 0.22			\$ 0.00	\$ 0.01	\$ 0.40
	Quelato de Zinc 14%	1 kg	0.0008	\$ 0.22			\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.11
	Quelato de Cobre 14%	1 kg	0.001	\$ 0.22			\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.13
RIEGO POR CICLO	Agua ^b	m ³	0.0293	\$ 12.00			\$ 3.16	\$ 5.27	\$ 160.42
	Luz ^c	Kw	1.6412	\$ 3.92			\$ 6.43	\$ 12.87	\$ 391.37
OTROS INSUMOS	Charolas	pza	360	\$ 29.23			\$ 263.07	\$ 10,522.80	\$ 21,045.60
	Semilla alfalfa	kg ^e	0.325	\$ 70.00			\$ 68.25	\$ 2,730.00	\$ 83,037.50
	Semilla maiz	kg ^e	0.345	\$ 7.34			\$ 7.60	\$ 303.88	\$ 9,242.90
	Semilla cebada	kg ^e	0.335	\$ 4.60			\$ 4.62	\$ 184.92	\$ 5,624.65
	Desinfectante Swipol	Frasco 3.5 l	6	\$ 227.59	\$ 36.41	\$ 1,365.54			\$ 1,584.03
	Cloro (Cloralex)	l	10	\$ 2.59	\$ 0.41	\$ 25.90			\$ 30.04
	Mochila 15 l	Pza	1	\$ 730.00					\$ 730.00
								TOTAL	\$ 122,999.16

NOTAS

- ^aCiclo = 12 días
 - ^uAgua por charola/ciclo (Considerando que en un ciclo real se regarían 36 charolas por repisa)
 - ^cLuz por bomba/ciclo
 - ^bEl ciclo real considera 360 charolas en producción de FVH, 120 charolas de cada especie utilizada. A diferencia del ciclo experimental que solo se consideraron 36 charolas en el ciclo.
 - ^eCantidad de semilla x charola
- Número de ciclos por año= 30.41666667

Cuadro 7.3. Insumos ocupados para producir FVH en el sistema mixto.

CONCEPTO	Insumos	Presentación	Cantidad	Costo unitarios	I.V.A.	Sub-Total	Total por sistema (en el experimento)	Total por 360 charolas (ciclo real) ^b	Costos anuales
FERTILIZANTES POR CICLO ^a	Fosfato monoamónico MAP (kg)	25kg	0.03214	\$ 19.80			\$ 0.64	\$ 122.72	\$ 386.76
	Multi Cal GG (CaNO ₃) Kg	25kg	0.04385	\$ 8.90			\$ 0.39	\$ 7.81	\$ 237.41
	Multi K (KNO ₃) kg	25kg	0.04256	\$ 18.55			\$ 0.79	\$ 15.79	\$ 480.27
	Nitrato de Magnesio (kg)	25kg	0.09958	\$ 9.50			\$ 0.95	\$ 18.92	\$ 575.49
	Sulfato de magnesio (kg)	50 kg	0.04693	\$ 3.70			\$ 0.17	\$ 3.47	\$ 105.63
	Ac. Borico (gr)	20 kg	0.0012	\$ 0.03			\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.02
	Quelato de Hierro 13%	1 kg	0.01597	\$ 0.18			\$ 0.00	\$ 0.06	\$ 1.75
	Quelato de Manganeso 13%	1 kg	0.00298	\$ 0.22			\$ 0.00	\$ 0.01	\$ 0.40
	Quelato de Zinc 14%	1 kg	0.00074	\$ 0.22			\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.10
	Quelato de Cobre 14%	1 kg	0.00091	\$ 0.22			\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.12
RIEGO POR CICLO	Luz ^c	Kw	1.6412	\$ 3.92			\$ 6.43	\$ 12.87	\$ 391.37
OTROS INSUMOS	Charolas	pza	360	\$ 29.23			\$ 263.07	\$ 10,522.80	\$ 21,045.60
	Semilla alfalfa	kg ^d	0.325	\$ 70.00			\$ 68.25	\$ 2,730.00	\$ 83,037.50
	Semilla maiz	kg ^e	0.345	\$ 7.34			\$ 7.60	\$ 303.88	\$ 9,242.90
	Semilla cebada	kg ^f	0.335	\$ 4.60			\$ 4.62	\$ 184.92	\$ 5,624.65
	Desinfectante Swipol	Frasco 3.5 l	6	\$ 227.59	\$ 36.41	\$ 1,365.54			\$ 1,584.03
	Cloro (Cloralex)	l	10	\$ 2.59	\$ 0.41	\$ 25.90			\$ 30.04
	Mochila 15 l	Pza	1	\$ 730.00					\$ 730.00
								TOTAL	\$ 122,714.00

NOTAS

- ^aCiclo = 12 días
- ^bLuz por bombacéculo
- ^cEl ciclo real considera 360 charolas en producción de FVH, 120 charolas de cada especie utilizada. A diferencia del ciclo experimental que solo se consideraron 36 charolas en el ciclo.
- ^dCantidad de semilla x charola
- ^eNúmero de ciclos por año= 30.41666667

Cuadro 7.4. Insumos que se utilizaron para el sistema acuapónico.

CONCEPTO	Insumos	Presentación	Cantidad	Costo unitarios	I.V.A.	Sub-Total	Total por sistema (en el experimento)	Total por 360 charolas (ciclo real) ^v	Costos anuales
RIEGO POR CICLO	Luz ^c	Kw	1,6412	\$ 3.92			\$ 6.43	\$ 12.87	\$ 391.37
OTROS INSUMOS	Charolas	pza	360	\$ 29.23			\$ 263.07	\$ 10,522.80	\$ 21,045.60
	Semilla alfalfa	kg ^e	0.325	\$ 70.00			\$ 68.25	\$ 2,730.00	\$ 83,037.50
	Semilla maiz	kg ^e	0.345	\$ 7.34			\$ 7.60	\$ 303.88	\$ 9,242.90
	Semilla cebada	kg ^e	0.335	\$ 4.60			\$ 4.62	\$ 184.92	\$ 5,624.65
	Desinfectante Swipol	Frasco 3.5 l	6	\$ 227.59	\$ 36.41	\$ 1,365.54			\$ 1,584.03
	Cloro (Cloralex)	l	10	\$ 2.59	\$ 0.41	\$ 25.90			\$ 30.04
	Mochila 15 l	Pza	1	\$ 730.00					\$ 730.00
								TOTAL	\$ 120,926.04

NOTAS

^cLuz por bomba/ciclo

^pEl ciclo real considera 360 charolas en producción de FVH, 120 charolas de cada especie utilizada. A diferencia del ciclo experimental que solo se consideraron 36 charolas en el ciclo.

^eCantidad de semilla x charola

Número de ciclos por año= 30.4166667

Cuadro 7.6. Resultados de productividad en peso fresco (g) por charola, considerados para los cálculos de precio unitario en los diferentes sistemas.

Peso húmedo (g)/charola	Corrida	Acuapónico	Control	Hidropónico	Mixto
MAÍZ	#1	524	566.667	610.333	543.667
	#2	768.667	663	648.333	613
PROMEDIO		646.3335	614.8335	629.333	578.3335
CEBADA	#1	1256.33	1418.33	1308	1228.33
	#2	1361.67	1426.67	1375.67	1409.67
PROMEDIO		1309	1422.5	1341.835	1319
ALFALFA	#1	1546.33	1976.67	1768.33	1255.33
	#2	2613	2315.67	2241.33	1946.33
PROMEDIO		2079.665	2146.17	2004.83	1600.83
TOTAL		4034.9985	4183.5035	3975.998	3498.1635
Peso húmedo x ciclo (g)		484199.82	502020.42	477119.76	419779.62
Peso húmedo anual (Kg)		14727.74453	15269.78778	14512.3927	12768.29678

8. LITERATURA CITADA

Álvarez A, L. A. (Agosto de 2009). Tesis: Evaluación de avena, trigo y cebada para producción de forraje verde hidropónico. El Marqués, Qro, México.

Álvarez, V. F., Montero, R., & Palacios, N. (2011). Manual Producción de forraje verde hidropónico. 11. Perú: Soluciones Prácticas.

Al-Karaki, G. N., & Al-Hashimi, M. (2012). Green Fodder Production and Water Use Efficiency of Some Forage Crops under Hydroponic Conditions. *International Scholarly Research Network ISRN Agronomy* , 2012, 1-5.

A.O.A.C. (1990). *Official Methods of Analysis*. (A. o. Chemists, Ed.) USA.

Azooz RH, A. M. (1998). Effect of tillage and residue management on barley and canola growth and water use efficiency. *Can. J. Soil Sci* , 78, 649-656.

Barnhart, E. (2006). A Primer on New Alchemy's Solar Aquaculture. Cape Cod, Massachusetts, USA.

Carr PM, M. G. (1998). Forage and nitrogen yield of barley-pea and oat-pea intercrops. *Agron. J.* , 90, 79-84.

Cooper, A. J. (1996). *The ABC of NFT: Nutrient Film Technique : the World's First Method of Crop Production Without a Solid Rooting Medium* (2nd ed.). Casper Publications.

Diver, S. (2006). Aquaponics – Integration of Hydroponics with Aquaculture. (L. Rinehart, Ed.) *ATTRA – National Sustainable Agriculture Information Service* , 1-28.

FAO. (2009). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. La ganadería A examen. Roma, Italia.

FAO. (2001). Manual Técnico Forraje Verde Hidropónico. (D. J. Izquierdo, Ed.) Santiago, Chile. Recuperado el 2012

FAO, NRL. (2012). *Sistema de informacion de la FAO sobre el agua y la agricultura*. Recuperado el 2012, de http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/indexesp.stm

García T, J. F. (Noviembre de 2012). Tesis: Balance de materia y energía en un cultivo acuapónico (Tilapia-Lechuga) bajo invernadero. El Marqués, Querétaro, México.

Gericke, W. F., & Tavernetti, J. R. (1936). Heating of liquid culture media for tomato production. *Agricultural engineering* , 17, 141-42.

Hach Company. (2002). *The Handbook DR/2400 portable spectrophotometer*. USA.

Howell TA, T. J. (1998). Evapotranspiration, yield, and water use efficiency of corn hybrids differing in maturity. *Agron. J*, 90, 3-9.

Hughes, H., Heath, M., & Metcalfe, D. (1972). *Forrajes* (3ª ed.). México: Compañía Editorial Continental.

Jefferson PG, C. H. (2005). Comparative forage yield, water use, and water use efficiency of alfalfa, crested wheatgrass and spring wheat in a semiarid climate in southern Saskatchewan. *Can. J. Plant Sci.*, 85, 877-888.

Kalra, Y. P. (1998). *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. Boca Raton, FL, EUA: CRC Press.

Lauer JG, C. J. (2001). Forage yield and quality of corn cultivars developed in different eras. *Crop Sci.*, 41, 1449-1455.

León-Sánchez, R., Villanueva-Cuevas, G. J., González-Ledesma, I., García-López, P. M., Ruiz-López, M. A., & García-Chavez, A. A. (2010). Evaluación de subproductos agropecuarios en nutrición de tilapias *Oreochromis spp* (PISCES CICHLIDAE). *AquaTIC*, 32, 1-6.

Lewis, W. M., & Buynak., G. L. (1976). Evaluation of a revolving plate type biofilter for use in recirculated fish production and holding units. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 105 (6), 704-708.

Lewis, W. M., Yopp, J. H., Schramm, H. L., & Brandenburg, A. M. (1978). Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 107 (1), 92-99.

López-Aguilar, R., Murillo, B., & Rodríguez-Quezada, G. (2009). El forraje verde hidropónico (FVH): una alternativa de producción de alimento para el ganado en zonas áridas. *Interciencia*, 34 (2), 121-126.

McLearney, W. O. (1972). Irrigation of garden vegetables with fertile fish pond water. *New alchemy agricultural research*, 2.

Nelson, L. R. (2008). *Aquaponics food production. Raising fish and profit* (First ed.). Virgin Islands: Nelson and Pade, Inc.

NMX-AA-051-SCFI-2001. (s.f.). Análisis de agua - determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba.

Rakocy, J. (1999). The status of aquaponics, part 1. *Aquaculture Magazine*, 25 (4), 83-88.

Rakocy, J., Shultz, R. C., Bailey, D. S., & Thoman, E. S. (2003). Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. *South Pacific Soilless Culture Conference – SPSCC*, 648.

Ramirez, D., Sabogal, D., Jiménez, P., & Hurtado, H. (2008). La acuaponía: una alternativa orientada al desarrollo sostenible. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 4 (1), 32-51.

Rivera, A., Moronta, M., González-Estopiñán, M., González, D., Perdomo, D., García, D. E., y otros. (2010). Producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) en condiciones de iluminación deficiente. *Zootecnia Tropical*, 28 (1), 33-41.

Romero Valdez, M. E., Córdova Duarte, G., & Hernández Gallardo, E. O. (2009). Producción de forraje verde hidropónico y su aceptación en ganado lechero. *Acta universitaria*, 19 (2), 11-19.

Salas, L., Preciado, P., Esparza, J. R., Álvarez, V. d., Palomo, A., Rodríguez, N., y otros. (2010). Rendimiento y calidad de forraje hidropónico producido bajo fertilización orgánica. *Terra Latinoamericana*, 28 (4), 355-360.

SAGAR-INIFAP, CIRNOC, CELALA. (2000). *Libro Técnico. Producción y utilización de la alfalfa en la zona norte de México*. (1a ed., Vol. 2).

Samuel-Fitwi, B., Wuertz, S., Schroeder, J. P., & Schulz, C. (2012). Sustainability assessment tools to support aquaculture development. *Journal of Cleaner Production*, 32, 183-192.

Sitio Argentino de Producción Animal. (2006). *Curso Internacional en ganadería bovina subtropical*. Recuperado el 2012, de <http://www.produccion-animal.com.ar>

Sutton, R. J., & Lewis, W. M. (1982). "Further Observations on a Fish Production System That Incorporates Hydroponically Grown Plants". *Progress in Fish Culture*, 44, 55-59.

Urbano D, D. C. (2003). Evaluación del rendimiento y composición química de once variedades de alfalfa (*Medicago sativa*) bajo corte en la zona alta del estado de Mérida, Venezuela. *Rev. Fac. Agron.*, 20, 97-107.

Vargas R, C. F. (2008). Comparación productiva de forraje verde hidropónico de maíz, arroz y sorgo negro forrajero. *Agronomía Mesoamericana*, 19 (2), 233-240.

