

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

EVALUACIÓN DE LA TRANSPIRACIÓN EN LA VARIEDAD DE LA PLANTA
DULCETICO (CAPSICUM ANNUUM) EN CONDICIONES DE AMBIENTE
PROTEGIDO, EN CARTAGO COSTA RICA

MÓNICA MARÍA MÉNDEZ CENTENO

CARTAGO, 2019

EVALUACIÓN DE LA TRANSPIRACIÓN EN LA VARIEDAD DE LA PLANTA
DULCETICO (CAPSICUM ANNUUM) EN CONDICIONES DE AMBIENTE
PROTEGIDO, EN CARTAGO COSTA RICA

Mónica María Méndez Centeno

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Adrián Chavarría

Asesor

Marvin Villalobos

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

Milton Solórzano

Lector

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2019

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida. A mi madre María Félix Centeno Castañeda gracias por acompañarme en cada paso de mi vida y ser mi ejemplo de lucha a pesar de las adversidades.

Mónica Méndez Centeno.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	1
1.INTRODUCCIÓN.....	2
2.OBJETIVOS	5
2.1 OBJETIVO GENERAL	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3.REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
3.1 Ambientes Protegidos: Invernaderos	8
3.2 Estadística.....	9
3.2.1 Variables estadísticas.....	9
3.2.2 Análisis de datos.....	10
3.2.3 Regresión lineal.....	11
3.2.4 Análisis de varianza.....	12
3.2.5 Multicolinealidad.....	14
3.2.6 Coeficiente de Pearson.....	15
3.2.7 Coeficiente de determinación.....	17
3.2.8 Intervalos de confianza	18
3.3 Transpiración	20
3.3.1 Mecanismo de apertura y cierre estomático.....	24
3.3.2 Beneficios de la transpiración	28
3.3.3 Transpiración y radiación solar	28
3.3.4 Transpiración y radiación fotosintéticamente activa (PAR).....	29
3.3.5 Transpiración y temperatura	30
3.3.6 Transpiración y humedad relativa del invernadero	31
3.3.7 Transpiración y otros factores	31
3.3.8 Porómetro para estimar la transpiración	32
3.4 Contenido de agua relativo (CRA)	32
3.5 Características físicas del suelo	33
3.5.1 Textura.....	33
3.5.2 Densidad aparente	34

3.6 Capacidad de campo (CC).....	35
3.7 Punto de marchites permanente (PMP).....	36
3.8 Chile Dulce	38
3.8.1 Variedad Dulcetico	39
3.9 Evaluación de impacto	40
3.9.1 Análisis económico.....	40
3.9.2 Análisis ambiental	41
3.9.3 Análisis social	42
4.METODOLOGÍA	44
4.1 Recursos utilizados	45
4.2 Reconocimiento de la zona de estudio	45
4.3 Recolección de datos.....	47
4.4 Textura	48
4.5 Capacidad de campo (CC).....	48
4.6 Punto de marchites permanente (PMP).....	48
4.7 Densidad aparente.....	48
4.8 Análisis estadístico.....	49
4.8.1 Prueba de Grubbs	49
4.8.2 Prueba de correlaciones	50
4.8.3 Análisis de componentes principales.....	50
4.8.4 Regresión	50
4.8.5 Prueba de ANOVA.....	51
4.9 Intervalos de confianza.....	51
4.10 Contenido relativo de agua.....	52
4.11 Análisis de costos.....	52
4.12 Análisis ambiental.....	53
4.13 Análisis social	55
5.RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	56
5.1 Estudio del suelo	57
5.2 Hojas Altas	58

5.2.1 Horario de medición: 6am a 8am	58
5.2.2 Horario de medición: 9am a 11am	72
5.2.3 Horario de medición: 1pm a 3pm.....	75
5.2.4 Horario de medición: 3pm a 5pm.....	79
5.3 Hojas Medias	81
5.3.1 Horario de medición: 6am a 8am	81
5.3.2 Horario de medición: 9am a 11am	85
5.3.3 Horario de medición: 1pm a 3pm.....	89
5.3.4 Horario de medición: 3pm a 5pm.....	93
5.4 Hojas Bajas	95
5.4.1 Horario de medición: 6am a 8am	95
5.4.2 Horario de medición: 9am a 11am	99
5.4.3 Horario de medición: 1pm a 3pm.....	105
5.4.4 Horario de medición: 3pm a 5pm.....	108
5.5 Hojas Altas	113
5.5.1 Horario de medición: 6am a 12pm	113
5.5.2 Horario de medición: 12pm a 6pm.....	116
5.6 Hojas Medias	120
5.6.1 Horario de medición: 6am a 12pm	120
5.6.2 Horario de medición: 12pm a 6pm.....	124
5.7 Hojas Bajas	128
5.7.1 Horario de medición: 6am a 12pm	128
5.7.2 Horario de medición: 12pm a 6 pm.....	133
5.8 Contenido relativo de agua (CRA)	137
5.9 Análisis ambiental.....	139
5.10 Análisis social.....	142
6.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	143
7.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
8.ANEXOS	158
8.1 Anexo 1: Método de Bouyoucos	159

8.2 Anexos 2: Estudio del suelo	161
8.3 Anexo 3: Contenido relativo del agua.....	162
8.4 Anexo 4: Anomalías en el invernadero	163

Tabla de Cuadros

Cuadro 1. Escalas de interpretación para el coeficiente de correlación.	16
Cuadro 2. Interpretación de los valores de correlación.	16
Cuadro 3. Significado para los coeficientes de correlación.	17
Cuadro 4. Intervalos de clasificación para el coeficiente de determinación.	18
Cuadro 5. Rangos de densidad aparente para diferentes texturas del suelo	35
Cuadro 6. Valores de humedad del suelo para diferentes texturas del suelo	37
Cuadro 7. Rangos de contenido de agua en el suelo	38
Cuadro 8. Lista de costos para la investigación propuesta.	53
Cuadro 9. Rangos que se utilizan para la clasificación de los criterios aplicados en la EIA por Arboleda.....	54
Cuadro 10. Rangos de clasificación que indican la importancia del impacto de acuerdo con los resultados numéricos obtenidos.	54
Cuadro 11. Resultados del estudio de suelo	57
Cuadro 12. Primera prueba de valores atípicos: Transpiración de las hojas altas (6am-8am)	58
Cuadro 13. Segunda prueba de valores atípicos: Transpiración de las hojas altas (6am-8am)	60
Cuadro 14. Tercera prueba de valores atípicos: Transpiración de las hojas altas (6am-8am)	62
Cuadro 15. Primeras correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-6am-8am).....	63
Cuadro 16. Análisis de componente principal entre RS y PAR (hojas altas-6am-8am)	64
Cuadro 17. Segundas correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-6am-8am).....	64
Cuadro 18. Análisis de componente principal entre la RS y la T del invernadero (hojas altas-6am-8am)	65
Cuadro 19. Terceras correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-6am-8am).....	65
Cuadro 20. Análisis de componente principal para la RS y la T de la planta (hojas altas-6am-8am) ..	66
Cuadro 21. Cuartas correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-6am-8am).....	66
Cuadro 22. Análisis de componentes principales entre la RS y la HR del invernadero (hojas altas-6am-8am)	67
Cuadro 23. Quinta correlación entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-6am-8am).....	67
Cuadro 24. Análisis de varianza para la transpiración de las hojas altas (6am-8am)	68
Cuadro 25. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (6am-8am).....	68
Cuadro 26. Análisis de ANOVA de un solo factor para la transpiración experimental y calculada de las hojas altas (6am-8am)	71
Cuadro 27. Intervalos de confianza del 95% para las medias de la transpiración experimental y calculada (hojas altas-6am-8am)	71
Cuadro 28. Correlación entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas altas-9am-11am)	73

Cuadro 29. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (9am-11am).....	73
Cuadro 30. Intervalo de confianza del 95% para las medias de la transpiración experimental y la calculada (hojas altas-9am-11am).....	75
Cuadro 31. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-1pm-3pm)	76
Cuadro 32. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (1pm-3pm)	76
Cuadro 33. Intervalos de confianza del 95% para las medias de la transpiración experimental y la calculada (hojas altas-1pm-3pm).....	79
Cuadro 34. Correlaciones entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas altas-3pm-5pm).....	79
Cuadro 35. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (3pm-5pm)	80
Cuadro 36. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas altas-3pm-5pm).....	81
Cuadro 37. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas medias-6am-8am).....	82
Cuadro 38. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (6am-8am).....	82
Cuadro 39. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas medias-6am-8am).....	85
Cuadro 40. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas medias-9am-11am).....	86
Cuadro 41. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (9am-11am)....	86
Cuadro 42. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y calculada (hojas medias-9am-11am).....	89
Cuadro 43. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas medias-1pm-3pm).....	89
Cuadro 44. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (1pm-3pm).....	90
Cuadro 45. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas medias-1pm-3pm).....	92
Cuadro 46. Correlaciones entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas medias-3pm-5pm).....	93
Cuadro 47. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (3pm-5pm).....	93
Cuadro 48. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y calculada (hojas medias-3pm-5pm).....	94
Cuadro 49. Correlación entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas bajas-6am-8am).....	95
Cuadro 50. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (6am-8am).....	96
Cuadro 51. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas bajas-6am-8am).....	97
Cuadro 52. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas bajas-9am-11am).....	99
Cuadro 53. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (9am-11am).....	100

Cuadro 54. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas bajas-9am-11am).....	103
Cuadro 55. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas bajas-1pm-3pm).....	105
Cuadro 56. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (1pm-3pm).....	105
Cuadro 57. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y calculada (hojas bajas-1pm-3pm).....	108
Cuadro 58. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas bajas-3pm-5pm).....	108
Cuadro 59. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (3pm-5pm).....	109
Cuadro 60. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y calculada (hojas bajas-3pm-5pm).....	112
Cuadro 61. Correlaciones entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas altas-6am-12pm)	113
Cuadro 62. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (6am-12pm).....	113
Cuadro 63. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas altas-6am-12pm)	116
Cuadro 64. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-12pm-6pm)	116
Cuadro 65. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (12pm-6pm)	117
Cuadro 66. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas altas-12pm-6pm)	120
Cuadro 67. Correlaciones entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas medias-6am-12pm)	120
Cuadro 68. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (6am-12pm)..	121
Cuadro 69. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas medias-6am-12pm)	122
Cuadro 70. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas medias-12pm-6pm).....	124
Cuadro 71. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (12pm-6pm)..	124
Cuadro 72. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas medias-12pm-6pm)	126
Cuadro 73. Correlaciones entre las variables explicativas junto con su valor de probabilidad (hojas bajas-6am-12pm)	128
Cuadro 74. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (6am-12pm).....	128
Cuadro 75. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas bajas-6am-12pm)	130
Cuadro 76. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas bajas-12pm-6pm).....	133
Cuadro 77. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (12pm-6pm).....	133
Cuadro 78. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas bajas-12pm-6pm)	135

Cuadro 79. Contenido relativo de agua para los tejidos de la planta de chile Dulcético en invernadero (4/4/2019).....	137
Cuadro 80. Contenido relativo de agua para los tejidos de la planta de chile Dulcético en invernadero (4/5/2019).....	138
Cuadro 81. Agua que contiene la planta de chile Dulcético bajo ambiente protegido (del 2 de noviembre del 2018 hasta el 4 de abril del 2019)	138
Cuadro 82. Agua que contiene la planta de chile Dulcético bajo ambiente protegido (del 4 de abril hasta el 4 de mayo del 2019)	139
Cuadro 83. Evaluación de impacto ambiental para la investigación propuesta.....	141
Cuadro 84. Textura del suelo en estudio.	161
Cuadro 85. Humedad gravimétrica y volumétrica del suelo en estudio.	161
Cuadro 86. Capacidad de campo y punto de marchites permanente del suelo en estudio.....	161
Cuadro 87. Contenido relativo de agua para tres plantas de chile Dulcético bajo ambiente protegido (4/4/2019).....	162
Cuadro 88. Contenido relativo de agua para tres plantas de chile Dulcético bajo ambiente protegido (4/5/2019).....	162

Tabla de Figuras

Figura 1. Variables incidentes en el control microclimático en invernaderos	9
Figura 2. Intervalos de confianza de 95% para una media con distribución normal y varianza conocida	19
Figura 3. Estoma abierto y cerrado.	22
Figura 4. Estoma de Vicia faba observado en microscopio electrónico. (Estoma abierto en la parte izquierda y estoma cerrado en la parte derecha).....	23
Figura 5. Ruta del agua a través de la hoja.....	24
Figura 6. Diagrama causal de las interacciones entre el ambiente y la planta.....	26
Figura 7. Esquema que resume el comportamiento estomático a varias condiciones ambientales.....	29
Figura 8. Cambios en la abertura estomática del envés de hoja de Vicia faba y en la cantidad de radiación fotosintética activa incidente a nivel de la hoja.....	30
Figura 9. Diagrama triangular de textura propuesto por la USDA.	34
Figura 10. Planta de chile Dulcético en condiciones de ambiente protegido.	40
Figura 11. Porómetro de hojas de alta precisión utilizado en la investigación.....	45
Figura 12. Cultivo de chile Dulcético bajo ambiente protegido en el Tecnológico de Costa Rica, Cartago.....	46
Figura 13. Sistema de riego localizado para el cultivo de chile Dulcético bajo ambiente protegido en el Tecnológico de Costa Rica, Cartago.....	46
Figura 14. Gráfica de valores atípicos de transpiración de las hojas altas (6am-8am).....	59
Figura 15. Segunda gráfica de valores atípicos de la transpiración de las hojas bajas (6am-8am).....	61
Figura 16. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas altas (6am-8am)	69
Figura 17. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (6am-8am)	70
Figura 18. Gráfica de la humedad relativa del invernadero versus la transpiración de las hojas altas (9am-11am)	74
Figura 19. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (9am-11am)	75
Figura 20. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas altas (1pm-3pm)	77
Figura 22. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (1pm-3pm).....	78
Figura 21. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas altas (1pm-3pm).....	78
Figura 23. Gráfica de humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas altas (3pm-5pm).....	80
Figura 24. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (3pm-5pm).....	81
Figura 25. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (6am-8am).....	83
Figura 26. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas medias (6am-8am)	84
Figura 27. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas medias (6am-8am)	85

Figura 28. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (9am-11am)	87
Figura 29. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas medias (9am-11am)	88
Figura 30. Gráfica de la humedad relativa del invernadero versus la transpiración de las hojas medias (9am-11am)	88
Figura 31. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (1pm-3pm).....	91
Figura 32. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas medias (1pm-3pm).....	91
Figura 33. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas medias (1pm-3pm).....	92
Figura 34. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (3pm-5pm).....	94
Figura 35. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas medias (3pm-5pm).....	95
Figura 36. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (6am-8am)	97
Figura 37. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas bajas (6am-8am)	98
Figura 38. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (9am-11am)	101
Figura 39. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (9am-11am)	102
Figura 40. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas bajas (9am-11am)	103
Figura 41. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas bajas (9am-11am)	104
Figura 42. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (1pm-3pm).....	106
Figura 43. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (1pm-3pm)	107
Figura 44. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas bajas (1pm-3pm).....	107
Figura 45. Gráfica de la humedad relativa del invernadero versus la transpiración de las hojas bajas (1pm-3pm).....	108
Figura 46. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (3pm-5pm).....	110
Figura 47. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas bajas (3pm-5pm).....	111
Figura 48. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas bajas (3pm-5pm).....	111
Figura 49. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas altas (6am-12pm)	114
Figura 50. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (6am-12pm)	115
Figura 51. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas altas (12pm-6pm).....	117

Figura 52. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas altas (12pm-6pm)	118
Figura 53. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (12pm-6pm)	119
Figura 54. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (6am-12pm)	122
Figura 55. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas medias (6am-12pm)	123
Figura 56. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (12pm-6pm)	125
Figura 57. Gráfica de la humedad relativa del invernadero versus la transpiración de las hojas medias (12pm-6pm)	126
Figura 58. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas medias (12pm-6pm)	127
Figura 59. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (6am-12pm)	129
Figura 60. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas bajas (6am-12pm)	132
Figura 61. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (12pm-6pm)	134
Figura 62. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas bajas (12pm-6pm)	135
Figura 63. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas bajas (12pm-6pm)	136
Figura 64. Primera anomalía del invernadero de la Escuela de Ingeniería Agrícola, Cartago	163
Figura 65. Segunda anomalía del invernadero de la Escuela de Ingeniería Agrícola, Cartago	163

Resumen

La presente investigación persigue examinar las variables que influyen significativamente en la transpiración de una planta de chile dulce, variedad Dulcético a través de un modelo estadístico. El proyecto se desarrolló bajo ambiente protegido en la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica, Cartago, con el objetivo de evaluar el efecto de la temperatura y humedad relativa de la hoja del cultivo en estudio, la radiación solar, la radiación fotosintéticamente activa, la temperatura y humedad relativa del invernadero sobre la transpiración presente en el cultivo.

Se realizaron varios horarios de medición para observar el comportamiento que presentaba dicha variable respuesta (transpiración) a través de las horas diurnas y también a diferentes alturas de la planta. Esto se realizó con ayuda de instrumentos de medición y los modelos estadísticos fueron realizados con ayuda de software especializados. Se determinó que las variables que mostraron mayor influencia en la transpiración de las hojas altas fueron la humedad relativa y temperatura de la hoja de la planta y la humedad relativa y temperatura del invernadero. Para la transpiración de las hojas medias y bajas las más influyentes fueron las mismas que se mencionaron con anterioridad, por lo que se comprueba la complejidad de los sistemas de los seres vivos. Se debe agregar, que se obtuvo el contenido relativo de agua (CRA) para los tejidos de la planta en estudio y los gramos de agua presentes en la planta en dos fechas diferentes de medición. Se da como resultado de que el CRA para cada tejido y los gramos de agua presentes en la planta aumentan con el paso del tiempo, debido al crecimiento de la misma.

1.INTRODUCCIÓN

El presente proyecto está encaminado a brindar un conocimiento esencial sobre el efecto que presentan ciertas variables o parámetros en la transpiración de la planta chile Dulcético a partir de una investigación realizada bajo ambiente protegido en la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

La importancia de esta investigación está basada en ayudar a incrementar la eficiencia del uso del agua en el cultivo de chile dulce para futuros proyectos, investigaciones, producciones del cultivo de esta planta, etc.

Para Bota et al. (2007), la comprensión de los procesos fisiológicos que determinan los flujos de agua en las plantas permite plantear la eficiencia en el uso del agua como un problema de control de gastos de agua respecto a los ingresos (hay que tomar en cuenta las variaciones de la disponibilidad y de la necesidad de agua de cada cultivo). La disponibilidad de agua en el suelo depende de los ingresos (lluvia, corrientes subterráneas, aguas superficiales, riego, entre otros.), de la capacidad de almacenamiento del suelo (proporción de elementos grueso, compactación del suelo, materia orgánica, porosidad del suelo, potencial hídrico, entre otros.), de la densidad y profundidad del sistema radicular de la planta.

El proceso de intercambio de gases, en el que las plantas fijan carbono de la atmósfera también tiene lugar a una pérdida (evapotranspiración) de vapor de agua desde la planta a la atmósfera. De este modo, la eficiencia en el uso del agua (EUA) de las plantas puede entenderse como el volumen de agua que éstas necesitan consumir (evapotranspirar) para fijar una determinada cantidad de carbono proveniente de la atmósfera. Se debe dejar claro, que este es un tipo de forma de medir la EUA. Es decir, hay más metodologías.

De esta manera, la eficiencia en el uso del agua de las plantas dependerá principalmente de tres tipos de factores: De aquellas características propias de la especie, de la evapotranspiración de agua y de las características del ambiente en el que crece y se desarrolla la planta. (Bota et al., 2007)

Mencionado lo anterior, se puede ver que la investigación tiene un gran peso en los agricultores, productores y en la sociedad en general. Las limitaciones que presenta dicha investigación son las siguientes:

- El tiempo requerido, ya que este proyecto tiene un plazo de entrega.
- La no existencia de antecedentes de modelos estadísticos para la transpiración de las plantas. Por lo que hay vacíos de información, pero a la vez se muestra la importancia de su desarrollo.

2.OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto que tiene la temperatura y humedad relativa de la hoja de la variedad Dulcético (*Capsicum annuum*), la temperatura y humedad relativa del ambiente protegido, la radiación solar y la radiación fotosintéticamente activa con la transpiración de la planta en estudio en la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la transpiración, temperatura y humedad relativa en diferentes estratos de altura de la planta Dulcético (*Capsicum annuum*) a diferentes rangos de horas del día.
2. Analizar cuáles son las variables significativas que influyen mediante un modelo estadístico en la transpiración de diferentes estratos de altura de la planta Dulcético (*Capsicum annuum*) a diferentes rangos de horas del día.
3. Comparar el contenido relativo de agua en los tejidos de la planta Dulcético (*Capsicum annuum*) a diferentes edades de la misma.
4. Analizar el impacto ambiental, económico y social relacionado a la investigación de la transpiración de la planta Dulcético en ambiente protegido.

3.REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Ambientes Protegidos: Invernaderos

Los invernaderos tienen la principal característica de aislar las condiciones climáticas del exterior y crear un microclima interior. Un microclima se define como el conjunto de condiciones climáticas propias de un área reducida y representa una modificación local del clima general. Por ejemplo: temperatura, humedad relativa y la radiación solar. La radiación solar es la principal fuente de energía en el microclima de un invernadero, y está directamente relacionada con el proceso de fotosíntesis que regula el crecimiento, la producción de las plantas y el desarrollo de microorganismos patógenos. También se le conoce con el nombre de radiación fotosintéticamente activa (PAR). En relación con la temperatura, se define como la cantidad de calor que presenta un cuerpo, objeto o la atmósfera y dentro de un invernadero está dada tanto por la radiación solar y la permeabilidad de los materiales de recubrimiento. La temperatura es un punto crucial dentro del sistema, ya que determina la actividad de las plantas y cantidad de agua contenida en el ambiente. (Beluzán, 2013, p.4)

Por otro lado, la humedad es la concentración de vapor de agua en la atmósfera. Depende de la temperatura del aire y se incrementa con esta. Cuando el aire no puede absorber más cantidad de vapor de agua, este se condensa, llegando al punto de saturación. La humedad relativa influye en algunas funciones de la planta como, por ejemplo: el crecimiento, la transpiración o la floración. Indirectamente influye en el desarrollo de enfermedades dadas las condensaciones que se producen en las estructuras del invernadero, lo que origina el goteo sobre la planta. (Rivero, 2018, p.61)

En la Figura 1 se puede observar las principales variables componentes del microclima en los ambientes protegidos.

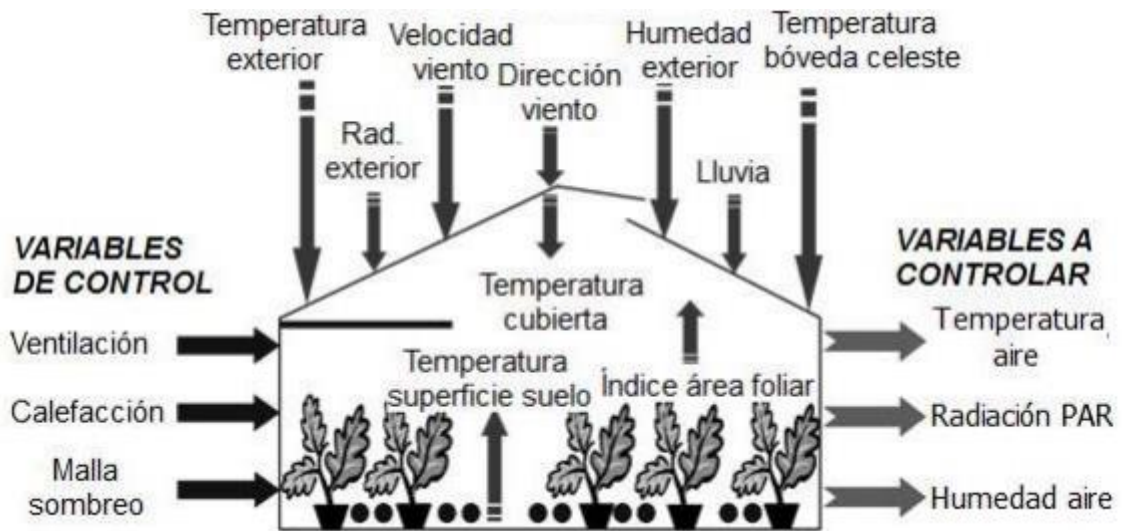


Figura 1. Variables incidentes en el control microclimático en invernaderos

Fuente: Beluzán, 2013

3.2 Estadística

El estudio de la estadística corresponde a la recolección, presentación, procesamiento, análisis y uso de datos para tomar decisiones, solucionar problemas y diseñar productos y procesos. Los métodos estadísticos se utilizan como una herramienta para describir y entender la variabilidad de los procesos. Por variabilidad se entiende a las observaciones sucesivas de un sistema o fenómeno que no producen el mismo resultado. (Franco, García, Hernández y Matus, 2006)

3.2.1 Variables estadísticas

- La media aritmética (también denominada media) es la medida de tendencia central que se utiliza con mayor frecuencia. Se calcula sumando todas los datos de un conjunto de observaciones, dividiendo después ese total entre el número total de elementos involucrados.
- La mediana es el valor que se encuentra en el centro de una secuencia ordenada de datos.
- La moda es el valor de un conjunto de datos que aparece con mayor frecuencia. Un conjunto de datos puede tener más de una moda o ninguna.

- El rango indica el número de valores que toma la variable y es la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de un conjunto de datos. El rango mide "la dispersión total" del conjunto de datos.
- La varianza se define como el promedio aritmético de las diferencias entre cada uno de los valores del conjunto de datos y la media aritmética del conjunto elevadas al cuadrado.
- La desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la varianza.
- La varianza y la desviación estándar miden la dispersión "promedio" en torno a la media aritmética, es decir, cómo fluctúan las observaciones mayores por encima de la media aritmética y cómo se distribuyen las observaciones menores por debajo de ella. (Estuardo, 2012)
- El coeficiente de variación es un coeficiente entre la desviación estándar y la media de todos los datos. (Dicovski, 2008)

3.2.2 Análisis de datos

En un análisis estadístico de datos es importante la recolección de la información u obtención del conjunto de datos. Sin embargo, por mucho cuidado que se tenga no se estará libre de errores de muestreo y de valores anómalos (valores atípicos, discrepantes o extraños.). Estos valores se encuentran alejados del comportamiento general del resto del conjunto de datos y no pueden ser considerados totalmente bajo el proceso de estudio ya que pueden generar resultados erróneos producto del análisis estadístico y por lo tanto es improbable obtener respuestas precisas que permitan caracterizar el proceso en estudio. Por lo que es fundamental detectar estos valores, ya sea para eliminarlos o para disminuir sus efectos en el análisis. (Fermín y Marcano, 2013)

Los valores atípicos pueden clasificarse en tres tipos basados en su composición y su relación con el resto de los datos:

- Los de tipo I son aquellos que corresponden a instancias individuales de los datos.
- Los valores atípicos de tipo II son datos individuales, pero se definen con respecto a un contexto específico.

- Los valores atípicos de tipo III constituyen un subconjunto de datos que se encuentra por fuera del conjunto total de datos. (Amón, 2010)

Los valores extremos de tipo I pueden ser detectados en cualquier tipo de dato, mientras que los de tipo II y tipo III requieren la presencia de estructura secuencial o espacial en los datos.

Las técnicas para detección de valores atípicos tipo I son las siguientes:

- Prueba de Grubbs.
- Prueba de Dixon.
- Prueba de Tukey.
- MOA.
- Regresión Lineal Simple. (Amón, 2010)

3.2.2.1 Prueba de Grubbs

La Prueba de Grubbs es una prueba recomendada por la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency - EPA), como un test estadístico para valores atípicos (anormales). (Fernández-Palomino, 2015)

3.2.3 Regresión lineal

Mencionar que la regresión lineal es un camino usual para estudiar la relación entre variables o atributos continuos de una población cuando tiene sentido tratar de predecir o explicar el comportamiento de una variable en términos del comportamiento de otras variables. Se trata de responder la pregunta, ¿cómo varía la variable respuesta “y” en función de una o más variables explicativas “x”? (Inzuna, Ramírez y Sánchez, 2014)

El modelo de regresión múltiple es semejante al modelo de regresión lineal simple, con la única diferencia de que aparecen más variables explicativas.

Modelo de regresión simple:

$$y = b_0 + b_1 * x_1 + u \text{ (Ecuación 1)}$$

Modelo de regresión múltiple:

$$y = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 + \dots + b_k * x_k + u \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

y = variable dependiente.

b_0 = ordenada al origen, indica el valor de y cuando x_i es igual a cero.

b_1 = es la pendiente de la recta, indica cuánto cambia y por cada incremento en x.

x_1 = variable que causa el cambio en la variable dependiente.

u = promedio de los residuos, también llamado error.

La ventaja de utilizar la regresión múltiple es que se tiene más información en la construcción del modelo y, seguidamente, se puede realizar estimaciones más precisas. (Rojo, 2007)

El análisis de regresión involucra los siguientes pasos (hay más pasos a seguir, sin embargo, estos son los que se toman en cuenta en este trabajo):

1. Definir: variable predictora y variable dependiente
2. Realizar análisis de correlación
3. Ajustar modelo de regresión
4. Intervalo de confianza para la media de “y” (variable dependiente) (Fallas, 2012)

3.2.4 Análisis de varianza

Castillo-Morales, García-Villalpando, Larqué Saavedra, Ramírez-Guzmán y Rendón-Sánchez y (2001) afirman que el análisis estadístico de datos derivados de un experimento tiene como propósito suministrar información sobre la manera en que las unidades experimentales responden a los tratamientos aplicados. Además, se dice que el primer paso consiste en someter los datos a un análisis de varianza para establecer si hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos.

El método de ANOVA, conocido también como análisis de varianza, se utiliza para calcular la variabilidad de un sistema de medición ya que posee la ventaja de cuantificar la variación debida a la interacción de las medias muestrales. Este método está basado en la misma técnica estadística utilizada para analizar los efectos de los diferentes factores en el diseño de experimentos. (Arbeláez-Salazar, Botero-Arbeláez y Mendoza-Vargas, 2007)

Para poder aplicar esta técnica, es necesario verificar las siguientes condiciones previas:

1. Independencia: Los individuos estudiados han de ser independientes unos de otros.
2. Aleatoriedad: Las muestras en estudio deben haberse obtenido de forma aleatoria.
3. Normalidad: Las muestras o grupos analizados deben seguir una distribución normal.
4. Homocedasticidad: Igualdad de varianzas en las muestras o grupos estudiados. (Melgar-Hidalgo, Ordaz-Sanz y Rubio-Castaño, s.f.)

Cabe mencionar que cuando la varianza no es constante indica que el modelo de regresión analizado es “Heterocedástico” (Piol, s.f.)

Según González y Murillo (2000), la heterocedasticidad consiste en que las observaciones muestrales tienen varianza del error diferentes entre sí y, por lo tanto, viola la hipótesis de homocedasticidad. La heterocedastidad puede surgir por causas estructurales (modelos de corte transversal con unidades muestrales de diferente tamaño) o muestrales (la recolección de información o muestreo genera perturbaciones con varianzas distintas).

La aplicación de la técnica ANOVA se basa en un contraste de hipótesis. La hipótesis nula que se contrasta en el ANOVA de un factor es que las medias poblacionales son iguales. Si se acepta la hipótesis nula, significará que los grupos no difieren en el valor medio de la variable dependiente y que, en consecuencia, dicho valor medio se podrá considerar independiente del factor. (Melgar-Hidalgo, Ordaz-Sanz y Rubio-Castaño, s.f.)

El análisis de varianza aporta la estimación de la varianza del error con sus grados de libertad y la información básica sobre si existe o no diferencias significativas en las medias de los tratamientos. Es decir, me dice si existe o no diferencia significativa pero no cuál o cuáles

son las variables responsables del rechazo. (Castillo-Morales, García-Villalpando, Larqué Saavedra, Ramírez-Guzmán y Rendón-Sánchez, 2001)

Para resolver lo anterior, se realiza una prueba de análisis de medias. Hay diversas formas de hacer este análisis, pero en este caso explicaremos la prueba de comparación múltiple usado ampliamente en investigación agrícola: Tukey.

Tukey (1953), propuso un procedimiento de comparación múltiple que está basado en los intervalos y es aplicable a los pares de medias. Solo necesita de un valor para juzgar la significancia de todas las diferencias. Ya que solo se hacen comparaciones por pares basadas en un rango estudentizado (consiste en la distribución que sigue la diferencia del máximo y del mínimo de las diferencias entre la media muestral). Llamada también “prueba de diferencias significativas honesta”. Además, esta prueba controla la tasa de error máximo experimental cuando los tamaños de muestra son iguales. (Vargas y Vargas, 2013)

Se debe agregar que esta prueba se realiza cuando el número de variables a comparar es alto (6 o más). (Barón-López y Téllez-Montiel, s.f.)

3.2.5 Multicolinealidad

Es importante observar si las variables explicativas o predictoras están muy correlacionadas entre sí ya que se puede dar como resultado una matriz que va a tener un determinante con valor cero o muy cercano a cero. Si hay al menos una variable puede ser expresada como combinación lineal del resto, el determinante de esta matriz es cero y dicha matriz será singular y no tendrá inversa.

Todavía cabe señalar que, si no hay variables que sean combinación lineal de las demás, pero están fuertemente correlacionadas, el determinante no será cero, pero tendrá un valor muy próximo a cero; lo que producirá una inestabilidad en la solución del estimador y da como consecuencia un aumento en su varianza. A los problemas provocados por la fuerte correlación entre las variables explicativas se les llama multicolinealidad. (Rojo, 2007)

El problema surge cuando hay, como mínimo, dos variables muy correlacionadas, entonces sucede que una de ellas le “quita” la correlación al resto de variables haciendo que las demás

aparezcan como no significativas o incluso significativas con un signo distinto al esperado. (Montero-Granados, 2016)

La multicolinealidad se puede detectar de las siguientes formas:

1. El determinante de la matriz de varianzas-covarianzas estará cercano a cero. Por lo que será una matriz singular, sin inversa.
2. Calcular el cociente entre el primer y último autovalor de la matriz de varianzas-covarianzas que será mayor de 50.
3. Calcular para cada variable el coeficiente de determinación (R^2) de dicha variable con el resto. (Rojo, 2007)
4. En la matriz de correlaciones de las variables explicativas, los valores cercanos a uno. (Chumacero, 2015)

La solución es eliminar del modelo aquellas variables explicativas que dependen unas de otras. (Rojo, 2007)

3.2.6 Coeficiente de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson (r): es un estadístico que proporciona información sobre la relación lineal existente entre dos variables cualesquiera. Este coeficiente da información que se refiere a dos características de la relación lineal: la dirección o sentido y la cercanía o fuerza. (Lahura, 2013)

El estadístico “ r ” posee las siguientes características:

1. El coeficiente mide la intensidad y dirección de la correlación lineal y, además, no excluye la posibilidad de que exista otra forma de correlación no lineal.
2. Su valor fluctúa entre 1 y -1. Cuando la asociación entre “ x ” y “ y ” es perfecta “ r ” es igual a 1 (todos los valores se ubican en una recta); cuando no existe correlación lineal su valor es 0.
3. El signo del coeficiente de correlación indica la dirección de la asociación. Cuando el valor de “ r ” es positivo se dice que existe una correlación positiva o directa; lo que se concluye que ambas variables aumentan y disminuyen a la vez. Por otra parte, si el signo

es negativo la correlación es negativa; lo que provoca que cuando una variable aumente, la otra disminuye y viceversa. (Fallas, 2012)

Seguidamente, se observa el Cuadro 1, 2 y 3 que muestra las escalas de interpretación para el coeficiente de correlación.

Cuadro 1. Escalas de interpretación para el coeficiente de correlación.

Rango del coeficiente de correlación de Pearson	Relación
0 - 0,25	Escasa o nula
0,26 - 0,50	Débil
0,51 - 0,75	Entre moderada y fuerte
0,76 - 1,00	Entre fuerte y perfecta

Fuente: (Cánovas, Martínez-Ortega, Martínez-Ortega, Pérez-Abreu y Tuya-Pendas, 2009)

Cuadro 2. Interpretación de los valores de correlación.

Valor r	Interpretación
1	Perfecta
0,9 - 1	Excelente
0,8 - 0,9	Buena
0,5 - 0,8	Regular
< 0,5	Mala

Fuente: (Reguant-Álvarez, Torrando-Fonseca y Vilá-Baños, 2018)

Cuadro 3. Significado para los coeficientes de correlación.

Valor	Significado
-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0,9 a -0,99	Correlación negativa muy alta
-0,7 a -0,89	Correlación negativa alta
-0,4 a -0,69	Correlación negativa moderada
-0,2 a -0,39	Correlación negativa baja
-0,01 a -0,19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0,01 a 0,19	Correlación positiva muy baja
0,2 a 0,39	Correlación positiva baja
0,4 a 0,69	Correlación positiva moderada
0,7 a 0,89	Correlación positiva alta
0,9 a 0,99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

Fuente: (González, 2016)

3.2.7 Coeficiente de determinación

Por lo que se refiere al coeficiente de determinación (R^2) se puede decir lo siguiente: Es una medida de la fuerza de la relación entre la variable dependiente e independiente, que nos indica cuán buen predictor de “y” es “x”. En consecuencia, es una medida de la capacidad de predicción del modelo. (Orellana, 2008)

Se dice que es un coeficiente adimensional; esto quiere decir que no está afectado por transformaciones lineales de las variables; por ello, si cambiamos las unidades de medida, el coeficiente de determinación permanecerá invariante. (Rojo 2007)

Propiedades del coeficiente de determinación:

1. Toma un valor entre el siguiente intervalo: $0 \leq R^2 \leq 1$
2. No depende de las unidades de medición (como se mencionó anteriormente).
3. Es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson
4. Mientras mayor es R^2 mayor es la fuerza de la variable regresora para predecir el resultado.
5. Mientras mayor sea R^2 menor es la RSS (residual de suma de cuadrados) y, por lo tanto, más cercanos están los puntos a la recta.
6. Toma el mismo valor cuando usamos a “x” para predecir a “y” o cuando usamos a “y” para predecir a “x”. (Orellana, 2008)

Seguidamente, se muestra el Cuadro 4 y se observan los intervalos en los que se puede clasificar el R^2 .

Cuadro 4. Intervalos de clasificación para el coeficiente de determinación.

Menor de 0,3	0,3 – 0,4	0,4 – 0,5	0,5 – 0,85	Mayor a 0,85
Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Sospechoso

Fuente: (Rojo, 2007)

3.2.8 Intervalos de confianza

El siguiente aspecto trata sobre los intervalos de confianza. Un intervalo de confianza es un rango de valores de una variable aleatoria de interés, construido con una probabilidad previamente especificada de incluir el verdadero valor de la variable o parámetro de la población.

La probabilidad especificada se conoce como nivel de confianza y los puntos extremos del intervalo se denominan límites de confianza. Al igual que el contraste de hipótesis clásico, los intervalos de confianza están fundamentados en el concepto de probabilidad frecuencial, lo cual implica regularidad cuando se considera un gran número de casos. (Behar, Salcedo y Yáñez, 2010)

La distribución muestral de medias, se forma a partir de todas las muestras posibles de tamaño n a las cuales se le calcula la media. Por lo tanto, si con cada una de las medias

muestrales se construye un intervalo del 95% de confianza, el 95% de ellos contendrán a el parámetro.

Este resultado, permite asegurar que cerca del 95% de las medias muestrales, se encuentran dentro de dos desviaciones típicas a ambos lados de la media poblacional (en este caso).

A continuación, en la Figura 2 se muestra un ejemplo del comportamiento de los intervalos de confianza en un nivel del 95% para una distribución normal.

Se observa también, como el factor que acompaña cada intervalo para un 95% de confianza es de 1,96. Este factor se denomina z y de igual manera se puede calcular.

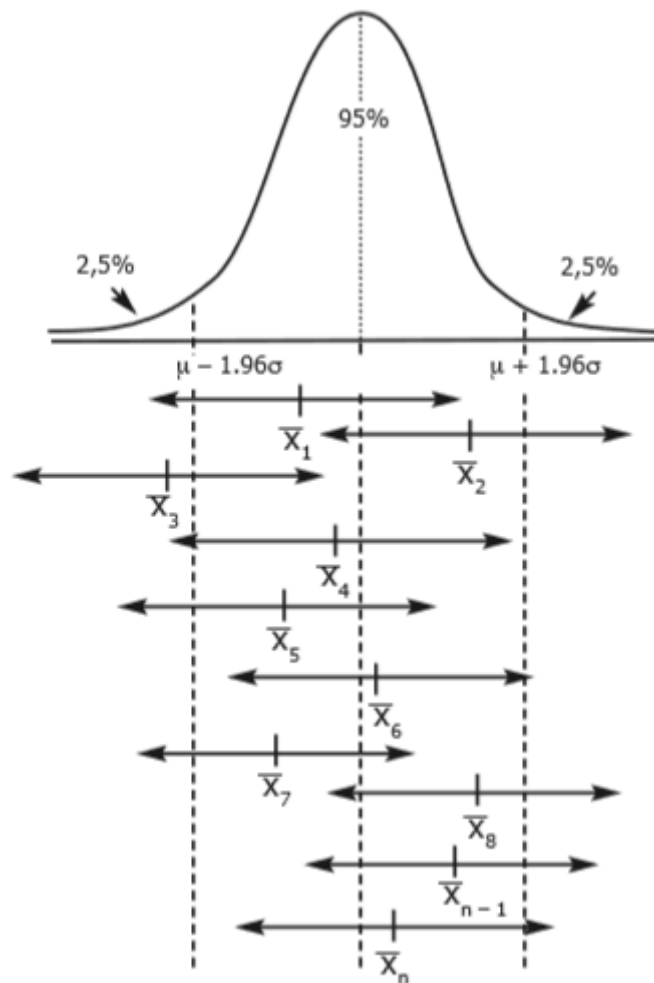


Figura 2. Intervalos de confianza de 95% para una media con distribución normal y varianza conocida

(Behar, Salcedo y Yáñez, 2010)

Según Orellana (2008) si el modelo lineal no es adecuado para nuestros datos hay dos caminos posibles:

- Abandonar el modelo de regresión lineal y usar un procedimiento más apropiado.
- Emplear alguna transformación de los datos.

Cada aproximación tiene ventajas y desventajas:

- Abandonar el modelo lineal, en general significa una mejor comprensión de la naturaleza del problema, pero también implica usar procedimientos más complejos para estimar los parámetros.
- Encontrar transformaciones apropiadas para las variables implica que el método de estimación de los parámetros será simple y en general el modelo contendrá menor número de parámetros, sin embargo, serán válidas solo para los datos transformados y no siempre es simple encontrar la transformación que solucione los problemas diagnosticados.

Para problemas de valores atípicos se propone una regresión robusta, para heterogeneidad de varianzas se propone regresión de mínimos cuadrados pesado y para una regresión no lineal se propone la regresión no paramétrica (Orellana, 2008)

3.3 Transpiración

En las relaciones hídricas de una planta un proceso importante es la absorción de grandes cantidades de agua a partir del suelo, su transporte a través de la misma y la pérdida de vapor de agua hacia la atmósfera circundante debido a la transpiración. Por lo tanto, la transpiración se define como la pérdida de agua en la planta en forma de vapor. (Azcón y Talón, 2013)

La transpiración fue demostrada en 1727 (antes que se conociera la fotosíntesis) por Stephen Hales. Él utilizó el método de encerrar una planta en un recipiente de vidrio y encontró agua líquida, que debió proceder de la planta, condensada en las paredes del recipiente. (Eichhorn, Evert y Raven, 1992)

Como se mencionó anteriormente la transpiración es la salida de vapor hacia la atmósfera circundante desde las superficies celulares y junto con el intercambio de dióxido de carbono (CO₂) determinan la eficiencia del uso del agua de una planta y se relación con la fotosíntesis. La pérdida de agua se produce a través de estructuras anatómicas:

Cutícula: pérdida del 10% del agua a través de la epidermis.

Lenticelas: pérdida del 5% del agua a través de las lenticelas (porciones de la peridermis con ordenación celular floja y menor suberificación) en la corteza de árboles o frutos.

Estomas: pérdida del 90% del agua a través de los estomas de las hojas. (Silva, 2016)

Según Casal (2007), la transpiración se da a través de los estomas. Se denominan así a los pequeños poros ubicados en la superficie de las hojas. La capa superficial de células de los órganos vegetales se denomina epidermis. Cada estoma está formado por el poro y dos células especializadas que lo limitan, las células oclusivas o guardianas. Estas células pueden abrir o cerrar (ocluid) el poro estomático en distintas circunstancias. Lo anterior se puede observar en la Figura 3 y 4.

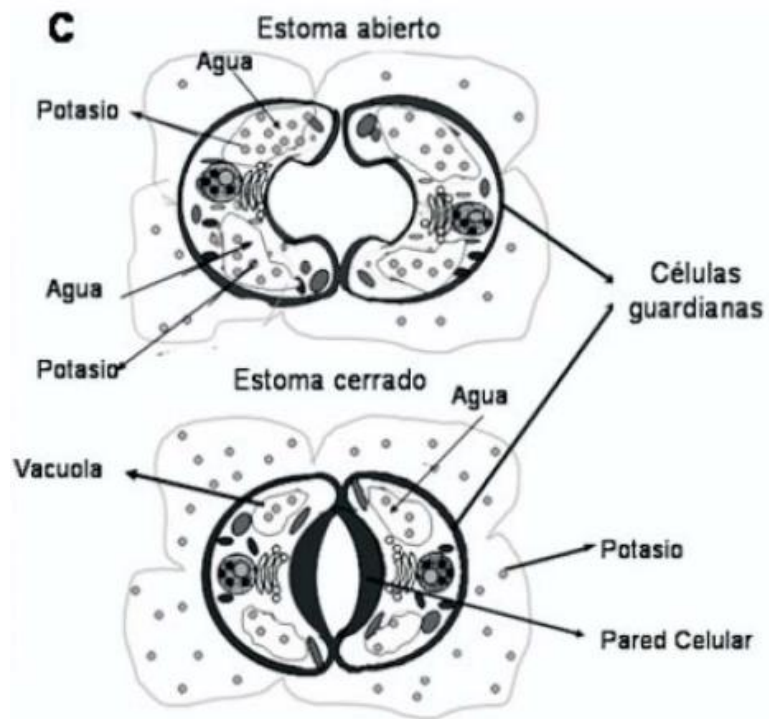


Figura 3. Estoma abierto y cerrado.

Fuente: (Cademil, Handford y Meisel, 2007)

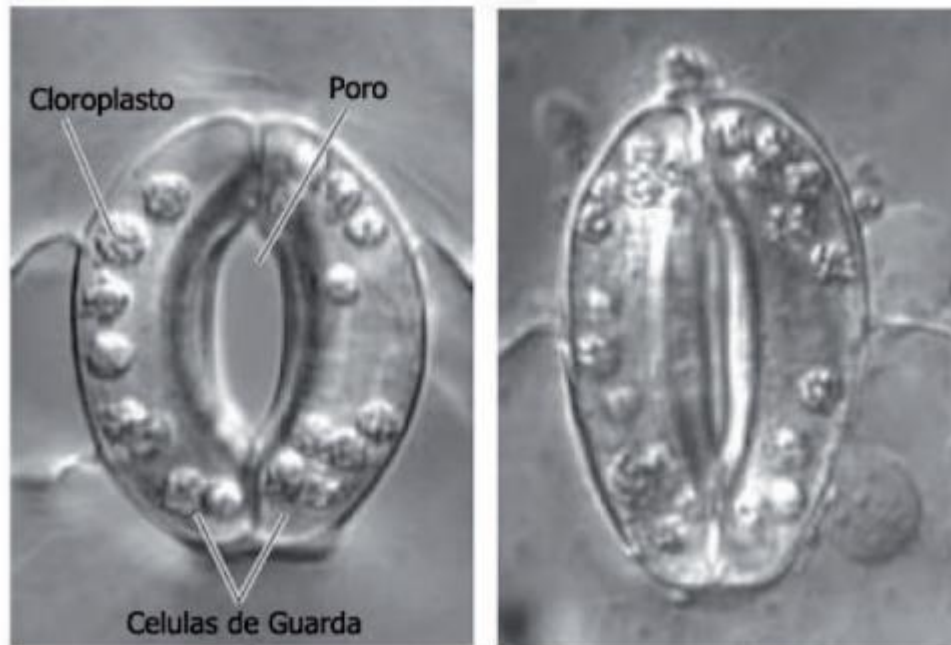


Figura 4. Estoma de Vicia faba observado en microscopio electrónico. (Estoma abierto en la parte izquierda y estoma cerrado en la parte derecha)

Fuente: (Moriconi, 2011)

En la Figura 5 se muestra que, desde la epidermis hacia el interior de la hoja, a la altura de los estomas no hay otras células. Solo queda un espacio o cámara estomática llena de vapor de agua.

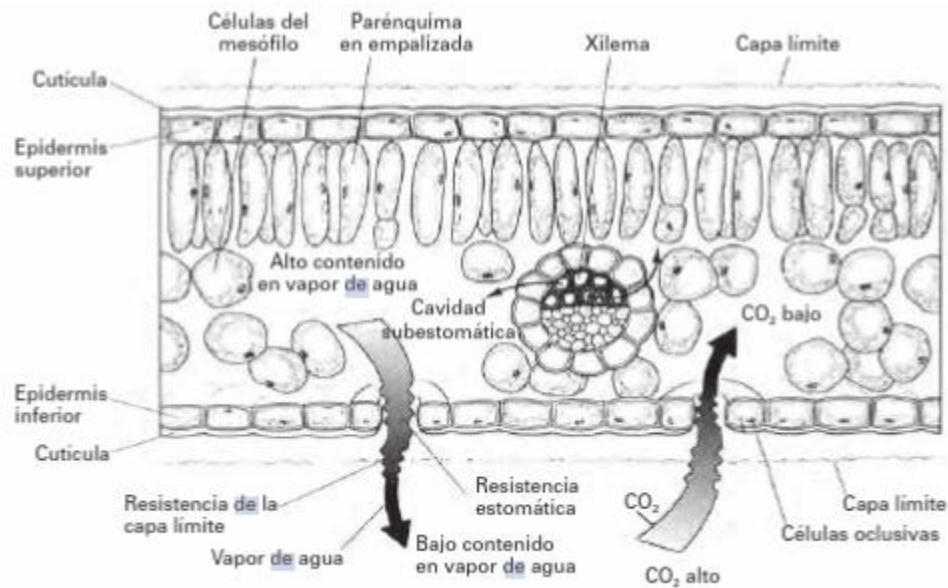


Figura 5. Ruta del agua a través de la hoja

Fuente: (Azcón y Talón, 2013)

El agua fluye desde el xilema hacia las paredes celulares del mesófilo, donde se evapora en los espacios aéreos en el interior de la hoja. El vapor de agua se mueve por difusión a través del espacio aéreo hacia el poro estomático, y atraviesa la capa límite de aire en contacto con la superficie de la hoja. El Dióxido de carbono (CO₂) también difunde hacia la hoja a través del estoma por medio de un gradiente de concentración. (Azcón y Talón, 2013)

3.3.1 Mecanismo de apertura y cierre estomático

La apertura del estoma requiere un incremento en el turgencia de las células oclusivas mientras que el cierre requiere una disminución de esta.

El aumento de turgencia en las células guardianas requiere de la entrada de agua, la que es explicada por una disminución del potencial osmótico dentro de la célula. Los experimentos de Fischer y Hsiao mostraron la absorción del ión potasio (K⁺) como mecanismo primario en la apertura estomática. (Silva, 2016)

Por lo que se refiere a la tasa de transpiración depende de: suministro de energía para evaporar el agua, el gradiente de presión de vapor y de la magnitud de resistencia del tejido

vascular de la planta. Todavía cabe señalar que la diferencia de presión de vapor de agua entre el aire y la hoja es la fuerza dirigente del mecanismo de transpiración. La presión de vapor del aire se relaciona con la humedad absoluta y la temperatura y la presión de vapor de la hoja se asocia con la temperatura y el potencial hídrico. (Romero, 2012).

La capa límite en la hoja se define como una capa de fluido (aire) que se mueve más lenta sobre los contornos de los cuerpos, debido a la acción de las fuerzas de fricción sobre una superficie. A menor velocidad del viento mayor es el espesor de la capa límite. Además, la capa límite se relaciona con el intercambio de calor y de gases entre las hojas y la atmósfera. El grosor de la capa límite es una función de la velocidad del viento y el tamaño de la hoja. Recalcar que la capa límite afecta el intercambio de calor entre la hoja y la atmósfera, el paso de vapor de agua de la cavidad del estoma hacia la atmósfera, y la absorción de CO₂ desde la atmósfera. (Romero, 2012)

Se debe agregar que la capa límite también tiene una relación interesante con el balance térmico de la hoja. El viento reduce la temperatura de la hoja, lo que provoca un descenso en el déficit de presión de vapor (DPV) en la capa límite en la hoja y por tanto reduce la tasa de transpiración. Así mismo, un incremento en la temperatura foliar puede disminuir la resistencia de la capa límite debido a que produce un efecto ascensional del aire que rodea la hoja. (Romero, 2012)

En la Figura 6 se muestra un diagrama causal de factores que interactúan entre sí. Cuando el aumento de la intensidad de un factor corresponde a un incremento correlativo de otro factor se asignó un signo positivo, por ejemplo: un aumento del DPV produce un aumento de la transpiración. Y cuando el aumento de un factor está asociado con la disminución del otro se asignó el signo negativo, por ejemplo, la disminución del contenido de agua en el suelo determina una disminución de la conductancia estomática. Se observa que al aumentar la intensidad del viento se disminuye el espesor de la capa límite y esto genera un aumento en la conductancia de la capa límite que a su vez aumenta el intercambio de calor entre la hoja y el ambiente, ocasionando la disminución de la temperatura de la hoja. A su vez esta disminución

genera una disminución del déficit de presión de vapor en el estoma que ocasiona la disminución de la transpiración. (Romero, 2012)

Hay dos factores que obran en sentido contrario: por un lado, la disminución de la temperatura foliar ocasionada por el adelgazamiento de la capa límite produce una disminución de la transpiración; a su vez, ese mismo adelgazamiento ocasionará un incremento de la transpiración al disminuir la resistencia al flujo de vapor de agua entre la hoja y la atmósfera. Este tipo de fenómenos expresan la complejidad de los sistemas de los seres vivos. (Romero, 2012)

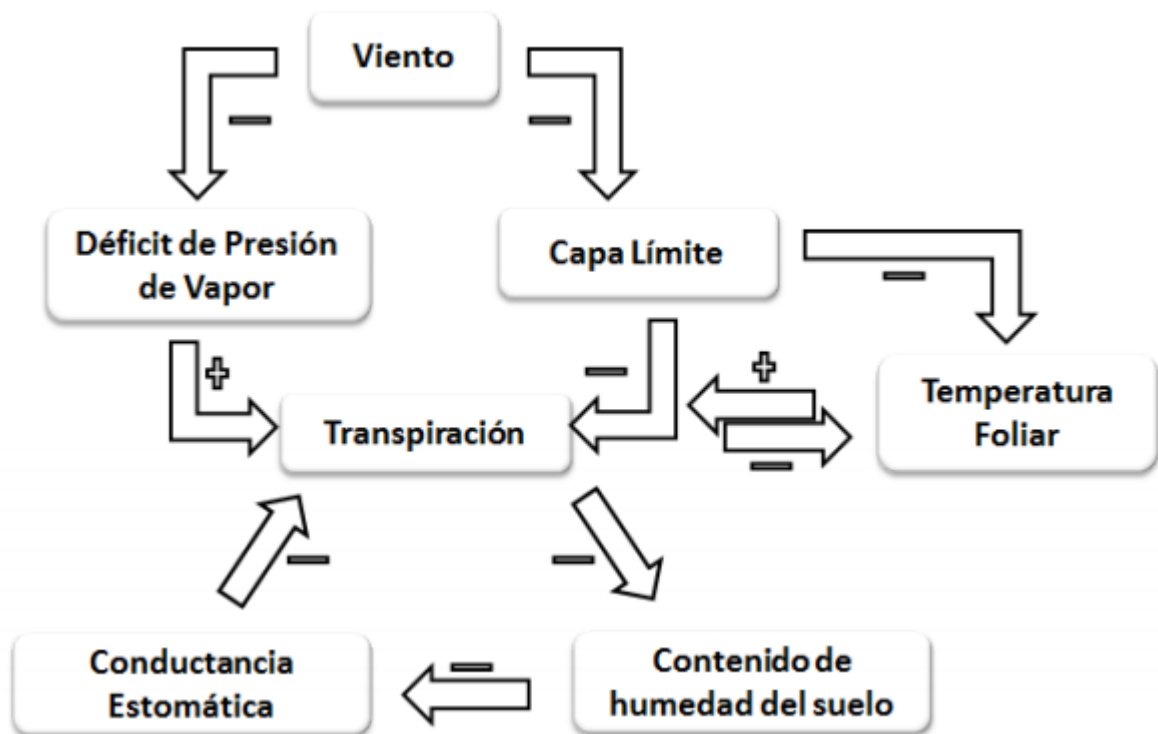


Figura 6. Diagrama causal de las interacciones entre el ambiente y la planta

Fuente: (Romero, 2012)

Cuanto mayor es la temperatura de la hoja, mayor es la cantidad de vapor de agua que contiene en la cámara del estoma y por lo tanto más transpira. A su vez, la temperatura de la hoja depende de la temperatura del aire y de la luz solar que llegue a la hoja. Las plantas presentan algunas adaptaciones que en determinados casos pueden ayudarle a bajar la temperatura de sus hojas y por lo tanto reducir la pérdida de agua. (Casal, 2007)

Si la temperatura del aire es muy elevada o baja, la hoja tiende a adaptarse al régimen térmico que se da en el ambiente. (Fontana, 2014, p.40)

Según Romero (2012) la transpiración consiste en un transporte de nutrientes a las diferentes partes de las plantas y, además, cumplen un papel muy importante en la regulación térmica pues la energía requerida para el cambio de fase del agua de su estado líquido a gaseoso genera una sensación refrigerante para las plantas.

Cuanto más húmedo es el día menor es la transpiración por parte de la planta. Además, es muy importante la presencia o no de viento, pues este genera un mezclado turbulento de la atmósfera. Si el día está sin viento el vapor de agua se mueve sólo por difusión. La difusión es un mecanismo eficiente para cortas distancias, como la existente entre la cámara estomática y la atmósfera que la rodea, pero es lento para caminos largos, por lo que el aire cercano a las hojas se cargaría rápidamente de vapor. (Casal, 2007)

La transpiración también está en relación directa con el número y abertura de los estomas. (Cañizares, Perozo, Rodríguez y Sanabria, 2003). El tamaño del poro estomático está determinado por el volumen de las células oclusivas y por la presión de turgencia. Pueden alcanzar de 5 a 15 μm de ancho y cerca de 20 μm de longitud. Además, es importante mencionar que se puede encontrar un rango de 20 a 400 estomas por mm^2 . (Herrera, 2015)

Esquivia-Camargo (1992) menciona que las plantas cuya transpiración es más intensa es porque poseen un gran número de estomas en el envés de la hoja, en contraposición con aquellas que casi no tienen estomas y su transpiración es débil.

Cuando los estomas están distribuidos en una superficie plana, sin pelos y sin irregularidades en la superficie, la emisión de vapor de agua se facilita, ya que el contacto con el medio ambiente es inmediato. En el caso contrario la transpiración es débil. (Esquivia-Camargo, 1992)

Se debe agregar que la intensidad de la transpiración está en relación inversa con respecto al espesor de la cutícula. Las hojas que transpiran más son las jóvenes, ya que poseen una

cutícula más delgada que las hojas viejas, ya que estas presentan una cutícula gruesa. (Esquivia-Camargo, 1992)

Según Avendaño et al. (2015), son diversos los factores que controlan la apertura y cierre de los estomas: la concentración de CO₂ en el interior de las hojas, humedad atmosférica, potencial hídrico de la hoja, temperatura y viento.

3.3.2 Beneficios de la transpiración

De acuerdo con León y Squeo (2007) algunos beneficios de la transpiración son los siguientes: La transpiración puede ayudar a la absorción de un mineral desde el suelo y transportarlo dentro de la planta. Algunas plantas no crecen bien al reducir la transpiración y las células pueden funcionar mejor con algún déficit hídrico, sugiriendo entonces la existencia de una turgidez óptima para las células. La turgidez corresponde a la capacidad de contener bastante agua en los tejidos.

3.3.3 Transpiración y radiación solar

Según Herrera (2015), la luz es el estímulo más importante en la apertura de los estomas. Se ha demostrado que la luz tiene una influencia muy notable sobre los estomas, ya que provocan la abertura de los ostiolos. En la mayoría de las plantas los ostiolos están cerrados en la noche y cuando reciben los primeros rayos del sol, comienzan a aumentar su abertura. (Esquivia-Camargo, 1992)

Además, según Silva (2016) la planta absorbe luz y radiación infrarroja desde su alrededor, pero a su vez irradia energía infrarroja. Si absorbe más energía que la que irradia entonces el exceso se disipará por convección o transpiración ya que tiene un efecto directo sobre la apertura estomática.

Se debe agregar que habitualmente, los estomas se abren con la luz al amanecer y se cierran con la oscuridad. Una planta típica en un día normal alcanza su máxima apertura estomática durante las horas de la mañana y hacia medio día. Sin embargo, a medio día hay plantas que producen una reducción de su conductividad, cuando se presentan los mayores valores de DPV. Plantas en suelos con un bajo potencial hídrico suelen abrir sus estomas sólo durante las primeras horas del día. La excepción a este comportamiento típico son las plantas

con metabolismo ácido de las crasuláceas (plantas CAM), cuyos estomas se mantienen cerrados durante el día y abierto en el transcurso de la noche. (Squeo y León, 2007)

Lo mencionado anteriormente se puede observar en la Figura 7 que esquematiza el comportamiento estomático a varias condiciones ambientales.

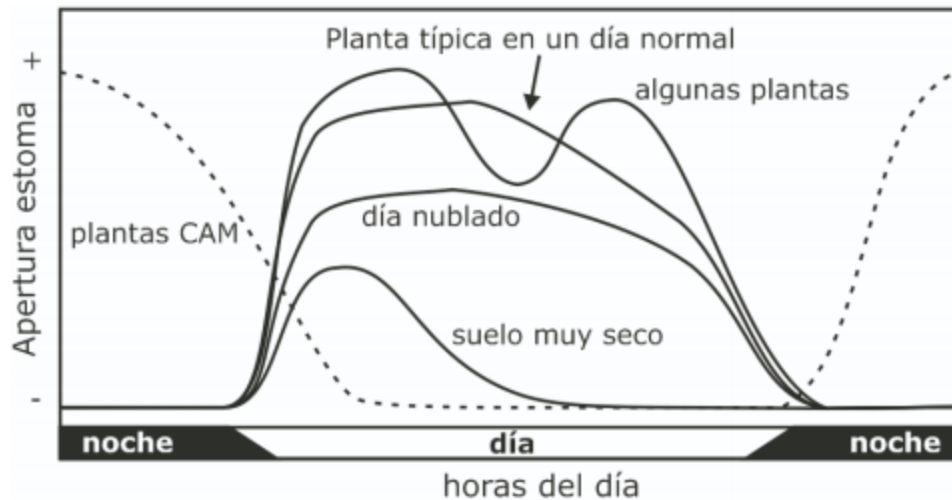


Figura 7. Esquema que resume el comportamiento estomático a varias condiciones ambientales.

Fuente: (Squeo y León, 2007)

3.3.4 Transpiración y radiación fotosintéticamente activa (PAR)

Cuando las plantas están bien regadas y se desarrollan en una atmósfera relativamente húmeda, la apertura estomática se ajusta a la intensidad luminosa.

El PAR promueve la apertura estomática, siendo absorbido por pigmentos clorofílicos en los cloroplastos de las células oclusivas y actuando a través de la provisión de energía en forma de trifosfato de adenosina (ATP, principal fuente de energía de los seres vivos) y solutos orgánicos. Este sistema es el más importante cuando los niveles de luz son relativamente elevados al mediodía y para que la apertura estomática sea muy amplia.

En la Figura 8 se puede observar como la apertura estomática aumenta con forme aumenta el PAR y como los estomas se abren durante el día y se cierran en la noche. (Azcón y Talón, 2013)

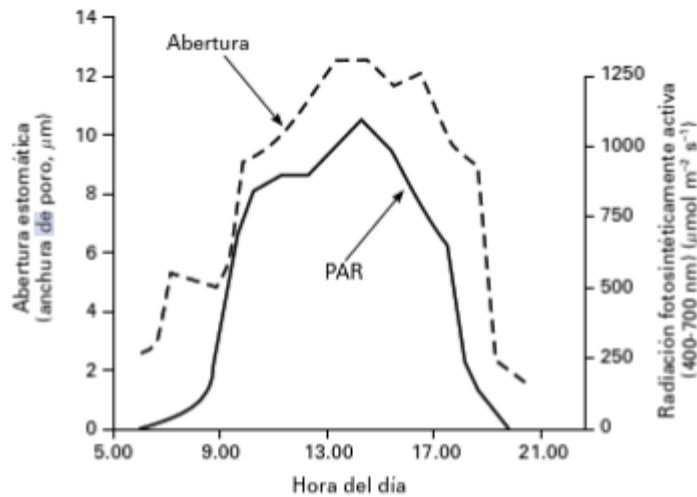


Figura 8. Cambios en la apertura estomática del envés de hoja de Vicia faba y en la cantidad de radiación fotosintética activa incidente a nivel de la hoja.

Fuente: (Azcón y Talón, 2013)

3.3.5 Transpiración y temperatura

Varios estudios sobre la relación que presenta los estomas de las plantas y la temperatura han arrojado resultados contradictorios. A menudo, el efecto de la temperatura se confunde con el efecto de las variaciones en la diferencia de presión de vapor entre la hoja y el aire.

Por tanto, es necesario efectuar estudios de respuesta a la temperatura en condiciones constantes de déficit de presión de vapor. En general los estomas tienden a abrirse a medida que la temperatura aumenta. No obstante, la magnitud de la respuesta depende de la presión de vapor. (Azcón y Talón, 2013)

Según Dell'Amico, Morales, Rodríguez, Sánchez y Torrecillas (2006) un rango de 0 a 30 °C favorece a la apertura estomática. Sin embargo, en este rango se debe de considerar los mecanismos de respuesta al CO₂. Además, a temperaturas moderadas, los aumentos de estas incrementan la transpiración al favorecer el proceso de difusión y apertura estomática.

Temperaturas superiores a 30 o 40 °C favorecen al cierre estomático ya que la cantidad de CO₂ aumenta y se cierran los estomas beneficiando los procesos respiratorios y no los fotosintéticos.

Otros estudios de la temperatura, fotosíntesis, transpiración y resistencia estomatal concluyen que las altas temperaturas en el invernadero, se incrementa la transpiración hasta el mediodía y disminuye cuando la temperatura es moderada. El aumento de la transpiración se debe a una disminución de la resistencia estomatal (Borrego, Mendoza y Santiago, 1998)

Rivero (2018) menciona que la temperatura, igual que la luz, incide en los procesos vitales de las plantas, tales como la fotosíntesis, germinación, floración, transpiración, crecimiento, entre otros.

3.3.6 Transpiración y humedad relativa del invernadero

La transpiración depende del déficit de saturación entre los estomas y el aire. Cuando es demasiado alto o bajo el déficit de saturación, estos influyen en la fisiología y desarrollo de la planta.

Si la humedad ambiental es demasiada alta, el intercambio gaseoso queda limitado y disminuye la transpiración y, por ende, la absorción de nutrientes y si es demasiado baja se cierran los estomas y se reduce la tasa fotosintética.

La humedad varía inversamente con la temperatura, para un contenido absoluto de vapor de agua constante en el aire.

Si la temperatura en el invernadero decrece la humedad relativa aumenta y puede alcanzar valores próximos a la saturación. Así mismo, la humedad relativa puede disminuir con el aumento de la temperatura y si el invernadero se encuentra bien ventilado pueden presentarse valores muy bajos. (Huertas, 2008)

3.3.7 Transpiración y otros factores

La escasez de macronutrientes como: Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Azufre (S) provoca reducciones de la abertura estomática en las plantas isohídricas. (Azcón y Talón, 2013)

Las plantas isohídricas son aquellas que cierran sus estomas cuando detectan una caída en el potencial hídrico del suelo, o un aumento en la demanda atmosférica. (Hugalde y Villa, 2014)

La abertura estomática también depende de: la edad foliar y las enfermedades, así como de la influencia de contaminantes gaseosos tales como el O₃, el SO₂ y los óxidos de nitrógeno. (Azcón y Talón, 2013)

3.3.8 Porómetro para estimar la transpiración

Hay varios tipos de porómetros foliares para medir la transpiración, sin embargo, en este caso se va a explicar el utilizado en esta investigación: El porómetro de estado estacionario.

El porómetro de estado estacionario consiste en una cámara abierta que se sujeta efectivamente en la superficie de la hoja y el vapor de agua liberado a través de los estomas establece un gradiente de humedad relativa (HR) a lo largo de la cámara. Este instrumento monitorea en dos puntos la HR a lo largo de la trayectoria de flujo y, una vez que el gradiente de flujo alcanza un estado estacionario, calcula y muestra la difusión de la conductancia en la hoja. Una hoja con un gradiente que cambia muy rápidamente indica que los estomas se encuentran relativamente abiertos. (Chávez, Mullan, Pask, Pietragalla y Reynolds, 2013)

3.4 Contenido de agua relativo (CRA)

El contenido de agua relativo se refiere a el contenido de agua del tejido respecto del total de agua que éste puede almacenar. Es la expresión más usada para medir el nivel de agua de un tejido. (Dalmas y Sanfilippo, 2012)

Se expresa en porcentaje y nos permite conocer el estado hídrico de la planta. A mayores CRA en hojas, mayor resistencia al déficit hídrico. Este valor se sigue tomando en cuenta junto con otros parámetros fisiológicos como indicadores de la respuesta de las variedades al estrés hídrico. (Dalmas y Sanfilippo, 2012)

El contenido de agua en los órganos vegetales puede presentar los siguientes rangos: en las raíces el contenido de agua va desde 48% a 94%, en las hojas es desde 77% a 98%, los frutos tienen entre 84% a 94% (Rodríguez, Sotelo, Suescun y Urrea, s.f.)

3.5 Características físicas del suelo

3.5.1 Textura

La textura se refiere a la cantidad en porcentaje y calidad de las partículas minerales que contiene el suelo. Existen varios tipos de partículas minerales en el suelo, pero las principales son: arena, limo y arcilla. Un suelo es llamado suelo franco cuando tiene arena, limo y arcilla en cantidades casi iguales, el suelo que es llamado franco-arenoso se da cuando hay más arena que limo y arcilla, el suelo es franco limoso cuando abunda más el limo y a el suelo se le llama franco arcilloso si la arcilla es el principal mineral. También están los suelos totalmente arcillosos, arenosos o limosos. En un mismo suelo se pueden encontrar diferentes tipos de textura. En realidad, la textura indica si un suelo es duro o suelto; los suelos duros contienen mucha arcilla y los suelos sueltos contienen más materia orgánica. (Marconi, 2011, pág. 8)

En la Figura 9 se muestra el diagrama triangular de textura. En el cuál con los porcentajes de limo, arcilla y arena se puede encontrar la textura de un suelo.

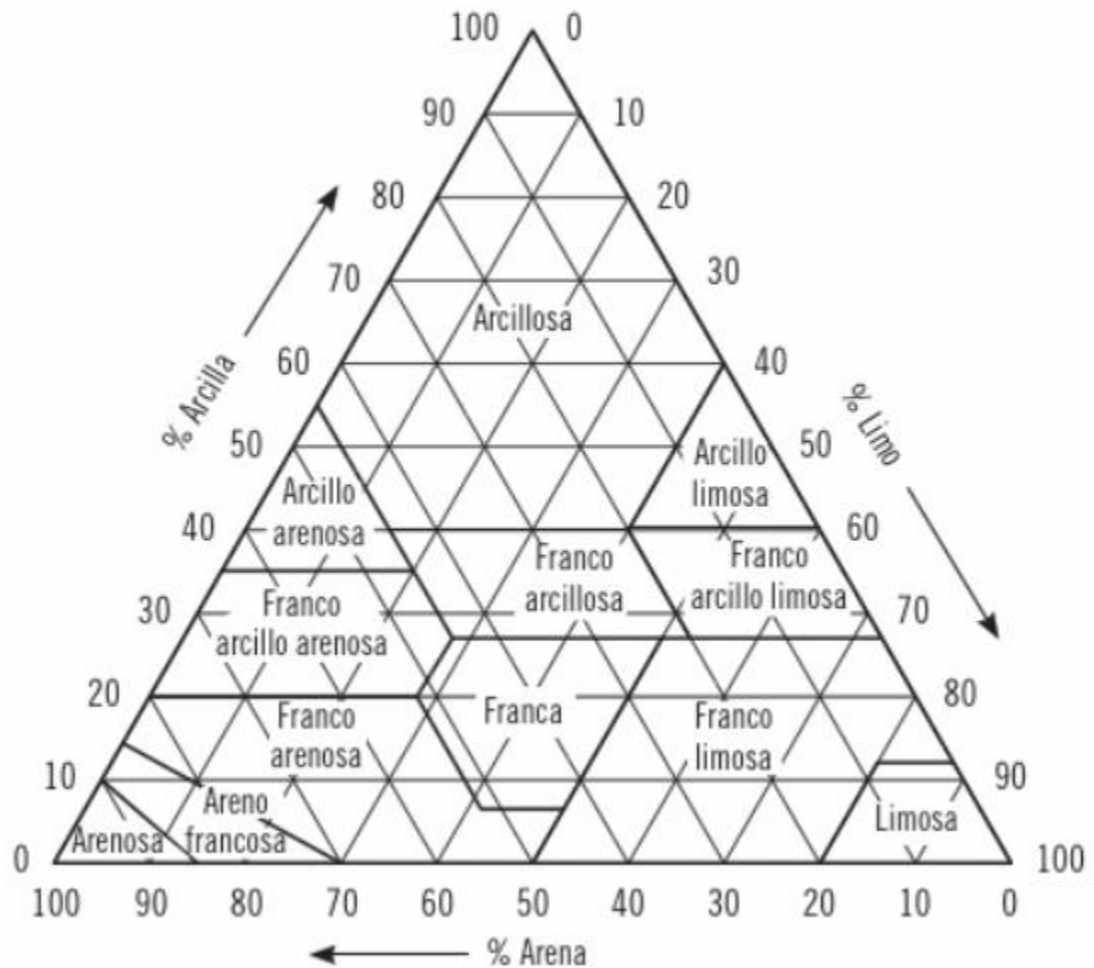


Figura 9. Diagrama triangular de textura propuesto por la USDA.

Fuente: (Salazar-Navarro, 2016)

3.5.2 Densidad aparente

La densidad aparente (D_a) se define como la masa de suelo por unidad de volumen (g/cm^3). Describe la compactación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso. Se utiliza para convertir datos expresados en concentraciones a masa o volumen, calcular la masa de un determinado espesor de suelo y para calcular la porosidad. La densidad aparente varía con la textura del suelo y el contenido de materia orgánica. (Villaseñor, 2016)

El método más utilizado es el método del cilindro, que considera el espacio poroso entre los agregados. Este método presenta poca variación, es fácil de repetir y su determinación es sencilla. (Villaseñor, 2016)

Dicho lo anterior, se muestra el Cuadro 5 en donde se pueden ver los rangos de densidad aparente para diferentes texturas del suelo. Es importante mencionar que con el método del cilindro los valores de g/cm^3 y mg/m^3 son equivalentes.

Cuadro 5. Rangos de densidad aparente para diferentes texturas del suelo

Suelo	Rango observado en suelos (mg/m^3)
Franco arenoso	1,4 - 1,8
Franco	1,4 - 1,7
Franco limoso	1,3 - 1,6
Arcilloso	0,9 - 1,4
Volcánico	0,3 - 0,95
Orgánico	0,15 - 0,45
Compactado	1,5 - 1,9
Panes	1,6 - 2,22

Fuente: (Villaseñor, 2016)

3.6 Capacidad de campo (CC)

Representa el contenido máximo de agua (límite superior de agua disponible en el suelo) retenido en el suelo en contra de la fuerza de gravedad en donde la mayoría de la macroporosidad está ocupada por aire. La capacidad de campo corresponde a una tensión de humedad de 0,333 atm. Sin embargo, se debe considerar que en un perfil de suelo la condición de humedad no solo depende de las fuerzas de retención de agua, sino también de las propiedades de transmisividad del agua. (Chavarría, 2013, p.74)

Este parámetro se puede estimar de la siguiente manera:

- Por medidas de la variación de humedad del suelo cada seis u ocho horas encontrando el momento en que es casi constante la pérdida de agua por el paso del drenaje rápido al drenaje lento.
- Cámaras de Richards (ollas de presión)
- Si se conocen los porcentajes de arena, limo y arcilla.

$$CC = 0,6382 * \% \text{ arcilla} + 0,2845 * \% \text{ limo} + 0,0507 * \% \text{ arena (Ecuación 3)}$$

Donde:

CC = Capacidad de campo (%)

- Si se conoce el punto de marchites permanente.

$$CC = 2,0421 * PMP - 2,3823 \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde:

CC = Capacidad de campo (%)

PMP = Punto de marchitez permanente (%) (Chavarría, 2013, p.74)

3.7 Punto de marchites permanente (PMP)

Corresponde al contenido de agua inferior (límite inferior de agua disponible en el suelo) retenida por las fuerzas capilares de la matriz del suelo absorbibles por las raíces de las plantas. Este se estima que se encuentra 10 atm y 20 atm, por lo cual un promedio de 15 atm es una buena aproximación. (Chavarría, 2013, p.74)

El punto de marchitez permanente se puede estimar de la siguiente manera:

- Por medio de medidas de campo utilizando plantas.
- Cámaras de Richards (ollas de presión)
- Si se conoce la capacidad de campo.

$$PMP = 0,4897 * CC + 1,1666 \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde:

PMP = Punto de marchites permanente (%)

CC = Capacidad de campo (%)

- Para suelos arcillosos

$$PMP = CC / 2 \text{ (Ecuación 6)}$$

- Para suelos medios
 $PMP = CC / 2,1$ (Ecuación 7)
- Para suelos livianos
 $PMP = CC / 2,2$ (Ecuación 8) (Chavarría, 2013, p.75)

Seguidamente en el Cuadro 6 y 7 se pueden observar valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente que se le ha dado a diferentes texturas del suelo.

Cuadro 6. Valores de humedad del suelo para diferentes texturas del suelo

Textura del suelo	CC (%)	PMP (%)	Humedad disponible (%)
Arenoso	9	2	7
Arenoso-Franco	14	4	10
Franco arenoso-limoso	23	9	14
Franco arenoso + materia orgánica	29	10	19
Franco	34	12	22
Franco-arcilloso	30	16	14
Arcilloso	38	34	4
Arcilloso estructurado	50	30	20

Fuente: (Chavarría, 2013)

Cuadro 7. Rangos de contenido de agua en el suelo

Textura	CC (%)	PMP (%)
Arcillosa	23-46	13-29
Franco arcillosa	18-23	9-10
Franca	12-18	4-11
Franca arenosa	8-13	4-6

Fuente: (Chavarría, 2013)

3.8 Chile Dulce

El chile dulce pertenece a la familia de las solanáceas (Solanaceae) y al género Capsicum, el cual tuvo su origen en el continente americano (sur de Brasil), pero la especie Capsicum annuum fue domesticada en México. Actualmente Capsicum annuum se cultiva en la mayoría de los países tropicales y subtropicales del mundo. (MAG, 2007)

Según Elizondo y Monge (2017) el chile dulce es una hortaliza rica en vitaminas como: provitamina A, vitamina B, vitamina C, y minerales como: calcio, fósforo, potasio y hierro.

En Costa Rica la mayoría de productores de chile dulce utilizan sistemas de producción a cielo abierto, alcanzando en 2006 un área de 285,8 ha. La producción tiene dos destinos: el mercado nacional y el internacional. Para el mercado nacional se producen mayoritariamente variedades con frutos de punta alargada (forma cónica) con una longitud entre 10 y 15 cm, mientras que el mercado internacional demanda variedades con frutos de forma cuadrada o rectangular con una longitud entre 7 y 14 cm.

La producción de hortalizas en invernadero satisface los compromisos de muchos mercados que posibilita enfrentar las durezas del cambio climático y sus efectos. Pueden controlarse con mayor certeza las variables ambientales (temperatura, humedad relativa, lluvia, luminosidad) y agronómicas (medio de cultivo, fertilizantes, riego, uso de sustratos, plagas y enfermedades).

La tecnología de producción en invernadero ha incrementado el rendimiento por unidad de superficie. Los rendimientos de chile dulce oscilan entre 8,2 y 42,9 ton/ha a campo abierto, y entre 30 y 150 ton/ha bajo ambiente protegido. Por otra parte, otros autores afirman que el rendimiento de chile dulce en invernadero puede llegar a 80 ton/ha, y en otras investigaciones se ha indicado que, en Florida, EEUU, la producción en invernadero varía entre 60 y 260 ton/ha.

3.8.1 Variedad Dulcético

El Dulcético es un híbrido de chile dulce desarrollado en Costa Rica por la EEAFBM (Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno). El producto del cruce controlado de dos genotipos diferentes es lo que se conoce como híbrido.

El híbrido se desarrolló con el objetivo de poner a disposición del mercado nacional semillas de alta calidad a precios más accesibles comparado con los materiales importados. Se utilizaron dos fuentes de material: materiales importados y adaptados a las condiciones del país con características de eficiencia en producción de frutos por unidad de planta, forma del fruto y calidad postcosecha, y materiales donados a la Universidad de Costa Rica por el Centro de Investigación para el Desarrollo de Vegetales de Asia (AVRDC).

Características:

- Mayor resistencia a plagas y enfermedades
- Gran calidad
- Altos rendimientos agronómicos
- Adaptado a las condiciones agroclimáticas del país
- Buen tamaño de los frutos
- Excelente sabor

El Dulcético fue liberado por la Oficina Nacional de Semillas (ONS) el 4 de diciembre del 2013. Además, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) garantiza la adecuada adaptación del híbrido en diferentes modalidades de manejo del cultivo: tradicional, orgánico, inorgánico, al aire libre o ambiente protegido. (Camacho, 2017)

Seguidamente, en la Figura 10 se observa este tipo de chile dulce en la etapa de crecimiento.



Figura 10. Planta de chile Dulcético en condiciones de ambiente protegido.

3.9 Evaluación de impacto

La evaluación de impacto es un procedimiento metodológico, por el cual se logra saber el valor que los diferentes autores les dan a las actividades, los recursos utilizados y los resultados obtenidos del proyecto.

La evaluación del impacto muestra el proceso de cómo los beneficiarios del proyecto se apropian de los conocimientos, servicios y apoyos proporcionados por el proyecto, y cómo los adaptan a sus circunstancias de vida para convertirlos en oportunidades de desarrollo individual y colectivo. (Impacto social, económico y ambiental, s.f.).

En todo análisis de viabilidad de un proyecto existen tres ejes principales de análisis: económico, social y ambiental.

3.9.1 Análisis económico

Mediante un estudio de impacto o viabilidad económica, se puede saber la cantidad económica que se necesitará para la investigación, cómo afectará a los participantes y saber si

la investigación va a ser lo suficientemente factible para realizar el gasto que se planea para obtener los resultados necesarios.

El propósito es analizar las necesidades de tipo económico y financiero con el fin de ayudar a valorar si el proyecto es rentable, o no. Se considera lo siguiente:

- La inversión económica necesaria y cómo se va a financiar.
- Estimar los costos y gastos que va a suponer la puesta en marcha del proyecto
- Valorar los posibles ingresos para realizar un cálculo aproximado de los beneficios que puede dar el proyecto. (Universidad de Barcelona, s.f).

Valor Actual Neto (VAN): El valor actual neto de un proyecto es el valor actual/presente de los flujos de efectivo netos de una propuesta, entendiéndose por flujos de efectivo netos la diferencia entre los ingresos periódicos y los egresos periódicos.

Tasa interna de rendimiento/retorno (TIR): Es otro criterio utilizado para la toma de decisiones sobre los proyectos de inversión y financiamiento. Se define como la tasa de descuento que iguala el valor presente de los ingresos del proyecto con el valor presente de los egresos. Es la tasa de interés que, utilizada en el cálculo del Valor Actual Neto, hace que este sea igual a 0. (Mete, 2014)

3.9.2 Análisis ambiental

Hay impacto ambiental cuando una acción o actividad produce una alteración, favorable o desfavorable, en el medio o en alguno de los componentes medio. Esta acción puede ser un proyecto de ingeniería, un programa, un plan, una ley o una disposición administrativa con implicaciones ambientales. (Ruberto, 2006)

Se debe agregar, que el término impacto no implica negatividad ya que éstos pueden ser tanto positivos como negativos.

Existen muchas definiciones de lo que es la evolución del impacto ambiental, algunas de ellas son:

“Estudio encaminado a identificar e interpretar, así como a prevenir, las consecuencias o los efectos que acciones o proyectos determinados pueden causar a la salud y bienestar humanos y al entorno, o sea, a los ecosistemas en que el hombre vive y de los cuales depende.” (Estevan, 1977).

“Es también un instrumento de gestión para la aplicación de las políticas ambientales (estatales, empresariales, personales) o para incorporar la variable ambiental en el proceso de la toma de decisiones tanto en el ámbito de un proyecto específico, como para planes nacionales de desarrollo, pasando por planes regionales, sectoriales y programas de actividades.” (Weitzenfeld, 1996).

“Es el estudio técnico, de carácter interdisciplinario, destinado a predecir, identificar, valorar y corregir las consecuencias ambientales que determinadas acciones pueden causar sobre la calidad de vida del hombre y el entorno.” (Conesa, 1997).

Para realizar el estudio de impacto ambiental (EIA) se va a utilizar una metodología que permite identificar las acciones que generan mayor impacto, mediante la cuantificación con un valor numérico.

El estudio de impacto ambiental consta de las siguientes partes:

1. La caracterización del proyecto, realizando la EIA para conocer en detalle las características generales y particulares de las acciones propuestas.
2. La caracterización del ambiente es el segundo elemento de las EIA y es fundamental para el análisis de los impactos ambientales que resultan del proyecto, al presentar en detalle las características y condiciones ambientales que mejor representan dichas afectaciones.
3. Evaluación de impactos ambientales, es donde se reconocen los principales impactos ambientales que puede generar el proyecto sobre el ambiente donde se insertará.
4. Finalmente se formula el plan de manejo, conjunto de obras o actividades que se formulan e implementan para atender los impactos ambientales. Corresponde a un ejercicio teórico, prospectivo y básicamente de trabajo de oficina o gabinete, con la implementación o construcción del proyecto. (Arboleda, 2008)

3.9.3 Análisis social

Según el documento *Impacto social, económico y ambiental* (s.f.) se menciona que el impacto social se refiere a los efectos que la investigación planteada tiene sobre la comunidad en general, mediante el análisis, monitoreo y administración de consecuencias sociales intencionadas o no, positivas y negativas de intervenciones planificadas. Aquí se generan una serie de preguntas que se ven en la necesidad de ser respondidas para realizar un correcto

análisis: ¿Quiénes son los beneficiarios de este proyecto?, ¿De qué manera se benefician con el proyecto?, ¿Qué otros impactos sociales generan este proyecto?

4.METODOLOGÍA

4.1 Recursos utilizados

1. Porómetro de hoja de alta precisión (Decagon, SC-1)



Figura 11. Porómetro de hojas de alta precisión utilizado en la investigación.

2. HOBOWare: Software con conexión mediante interfase USB para monitoreo y visualización de registros guardados de temperatura y humedad relativa en interiores.
3. Minitab 18: Software estadístico diseñado para ejecutar funciones básicas y avanzadas. Además, es amigable con Microsoft Excel en análisis estadísticos.
4. Libreta y lápiz para la toma de datos.

4.2 Reconocimiento de la zona de estudio

Como se mencionó anteriormente, la investigación se realizó bajo ambiente protegido con una la plantación de chile Dulcético (*Capsicum annum*), en la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago.

Este campus presenta las siguientes coordenadas geográficas: 9°51'16"N y 83°54'33"O.

A continuación, se muestra en la Figura 12 la plantación de chile Dulcético bajo el ambiente protegido donde se llevó a cabo la investigación y en la Figura 13 se observa el sistema de riego utilizado en la investigación (riego localizado).



Figura 12. Cultivo de chile Dulcético bajo ambiente protegido en el Tecnológico de Costa Rica, Cartago



Figura 13. Sistema de riego localizado para el cultivo de chile Dulcético bajo ambiente protegido en el Tecnológico de Costa Rica, Cartago

4.3 Recolección de datos

Los datos de transpiración, humedad relativa y temperatura de la planta se obtuvieron a partir del porómetro observado en la Figura 11. La toma de datos se realizó en los siguientes horarios:

1. De 6 am a 8 am.
2. De 9 am a 11 am.
3. De 1 pm a 3 pm.
4. De 3 pm a 5pm.

En cada horario se midieron 144 plantas y es necesario agregar que la medición de estos parámetros se realizó para diferentes alturas de las hojas de la planta: hojas altas, medias y bajas. La medición de datos tomó lugar en los siguientes meses del año 2019: Febrero, marzo y abril. Meses con mayor radiación solar si se compara con el resto de meses del año.

Para la toma de datos con el porómetro es importante lo siguiente:

Se eligió en cada medición una hoja limpia, seca, libre de enfermedades y que recibiera luz solar en la superficie adaxial. Además, se colocó la hoja en la cámara en el punto medio de la hoja para así asegurar de que el área seleccionada cubra totalmente la apertura del sensor. Durante la medición se tuvo cuidado de que el filtro blanco se encontrara hacia arriba recibiendo los rayos de sol por completo y de no permitir que otras plantas sombreen el filtro. (Chávez, Mullan, Pask, Pietragalla y Reynolds, 2013)

Es importante mencionar que no se deben seleccionar las hojas sombreadas o aquellas que estén en la oscuridad, ya que estas arrojarán lecturas muy distintas a las hojas expuestas a la luz. Las hojas deben estar limpias, secas, intactas, verdes, sin signos de daños o enfermedades. Las medidas deben de variar dentro de un 10% o aproximadamente $50 \text{ mmol/m}^2\text{s}$ entre cada una, de no ser así, se deberá medir una vez más. No se debe tocar el disco blanco filtrador de teflón en ningún momento; ya que esto ocasionará lecturas inexactas y el disco necesitará ser remplazado. (Chávez, Mullan, Pask, Pietragalla y Reynolds, 2013)

La recolección de datos que involucran las variables de: Temperatura de invernadero, humedad relativa del invernadero, radiación solar y la radiación fotosintéticamente activa se obtuvieron a partir del Software HOBOWare. Solamente se bajaron los datos recolectados por medio de USB, en los días que se midió los parámetros que involucra la planta.

4.4 Textura

Se determinó la textura del suelo por el método de Bouyoucos y si se desea este procedimiento se puede ver en el Anexo 1.

4.5 Capacidad de campo (CC)

Este valor se obtuvo utilizando la ecuación número tres (mostrada en el apartado anterior). Se utilizó este método debido a que es válido y se ha utilizado en diversos trabajos e investigaciones, también debido a la limitante del tiempo de entrega de esta investigación.

4.6 Punto de marchites permanente (PMP)

Se obtuvo con ayuda de la Ecuación 5 (mostrada en el apartado anterior), que también es un método válido para la determinación del punto de marchitez permanente.

4.7 Densidad aparente

Se eliminó una parte de la capa orgánica del lugar seleccionado para muestrear. Se colocó un cilindro muestreador con el lado afilado sobre la superficie a muestrear, seguidamente, se colocó una tabla de madera sobre el cilindro y se liberó contra peso con ayuda de un mazo pequeño hasta dicha tabla toque el suelo (penetración de forma vertical).

Se extrajo la muestra cuidadosamente con ayuda de una pequeña pala, verificando que en los extremos no se encontraran disturbios. Se llevó la muestra al laboratorio de suelos y con ayuda de una espátula se dejó las dos caras del cilindro planas (sin ejercer compresión o perder suelo). Se envolvió con malla o tela el extremo inferior del cilindro muestreador y se prensó con hule. Seguidamente, se pesó el cilindro junto con el suelo en una balanza y se llevó a la estufa por 24 horas a una temperatura de 105°C.

Luego de las 24 horas, se sacó de la estufa y se volvió a pesar el cilindro total, también se extrajo el suelo seco y se pesó en la balanza, y de igual manera, el cilindro limpio. Además,

con ayuda de una regla se midió el cilindro muestreador. Finalmente, la densidad aparente del suelo se obtuvo gracias a la Ecuación 9.

$$Dap = Pss / V \text{ (suelo + poros) (Ecuación 9)}$$

Donde:

Dap = Densidad aparente (g/cm^3)

Pss = Peso suelo seco

V = Volumen (cm^3)

4.8 Análisis estadístico

Todo el análisis estadístico se realizó con ayuda del programa estadístico Minitab 18. Seguidamente, se explican los pasos a seguir para cada prueba.

4.8.1 Prueba de Grubbs

Los datos son clasificados en orden ascendente y se calcula la media y la desviación típica. Aquellos puntos más altos o más bajos pueden ser declarados estadísticamente como un valor erróneo. (Fernández-Palomino, 2015)

En primer lugar, se introdujeron todos los datos involucrados en el estudio en la hoja de trabajo del programa estadístico y se procedió a realizar la prueba de valores atípicos para cada variable siguiendo el siguiente procedimiento:

- Seleccionar en la barra de herramientas la opción “Estadísticas”.
- Luego seleccionar “Estadísticas básicas”.
- Y seguidamente buscar la opción de “Prueba de valores atípicos” y por último seleccionar la prueba de Grubbs para obtener los valores anormales de cada variable.
- Y si se encontraban valores anormales, se procedía a eliminar ese valor y seguir con el análisis.

4.8.2 Prueba de correlaciones

Esta prueba se realizó seguidamente después de la prueba de Grubbs y el procedimiento es el siguiente:

- Seleccionar en la barra de herramientas la opción “Estadísticas”.
- Luego seleccionar “Estadísticas básicas”.
- Y seguidamente, seleccionar la opción de “Correlación”, ya en dicha ventana elegir en el “Método” la opción de correlación de Pearson.

4.8.3 Análisis de componentes principales

Seguidamente después, de obtener la matriz de correlaciones entre las variables explicativas se procedió a analizar las variables con el mayor coeficiente de Pearson con el fin de dejar la variable que explicará la mayor variabilidad entre ambas y desechar la otra para evitar la multicolinealidad.

- Seleccionar en la barra de herramientas la opción “Estadísticas”.
- Luego seleccionar “Análisis multivariado”.
- Y, por último, “Componentes principales”. En dicha ventana seleccionar las variables que se desean analizar y elegir el tipo de matriz en “Correlación”.

4.8.4 Regresión

La regresión múltiple se realizó con las variables explicativas que no presentaran correlaciones estadísticamente significativas para evitar problemas de multicolinealidad. Las variables que se sometieron al análisis de regresión (como se verá más adelante) se analizaron al cuadrado o al cubo con el fin de observar si presentaban significancia con la variable respuesta (transpiración).

Se consideraron los siguientes pasos en el programa estadístico:

- Seleccionar en la barra de herramientas “Estadísticas”.
- Luego seleccionar la opción “Regresión” y seguidamente la misma opción, “Regresión”.
- Además, seleccionar “Ajustar modelo de regresión”. Y en esa ventana seleccionar las variables explicativas y la variable respuesta que se desea analizar.

4.8.5 Prueba de ANOVA

Luego se procedió a realizar el análisis estadístico de ANOVA de un factor para la transpiración de la hoja medida en el campo de estudio y la calculada con el modelo estadístico propuesto. Y en este caso se siguen los siguientes pasos:

- Seleccionar en la barra de herramientas la opción “Estadísticas”.
- Luego seleccionar “ANOVA” y seguidamente la opción de “Un solo factor”.
- En la ventana de “Análisis de varianza de un solo factor”, seleccionar la opción de “los datos de respuesta están en una columna separada para cada nivel de factor”.

4.9 Intervalos de confianza

Para observar de una mejor manera del porqué se presentan interacciones de variables significativas con la transpiración y también la significancia de las demás variables mostradas en la ecuación, se realizaron gráficas de cada variable involucrada en la ecuación versus la transpiración de altura de hoja de la planta para ver el comportamiento que esta presentaba.

Se debe agregar, que se hizo un rango en donde se muestra un límite inferior, un promedio y un límite superior de la transpiración con respecto a la variable en estudio. Un intervalo aleatorio que, de forma probable, contiene el verdadero valor del parámetro. Es decir, intervalos de confianza.

Los intervalos de confianza se calcularon con la ayuda de la Ecuación 10. Importante mencionar que ese utiliza la fórmula para media con distribución normal de varianza conocida. Estos rangos se obtuvieron para la variable transpiración con un grado de confianza del 95%.

$$I_{1-\alpha}(\mu) = \left[x \pm z_{\alpha/2} * \frac{s}{\sqrt{n}} \right] \text{ (Ecuación 10)}$$

Donde:

I = Intervalo de confianza para la media, ya sea para el límite superior (suma) o para el límite inferior (resta) (mmol/m²s)

X = Promedio de la transpiración (mmol/m²s)

Z = 1,96 (como se mencionó en la literatura)

S = Desviación estándar

N = Número de datos

4.10 Contenido relativo de agua

El contenido relativo de agua se obtuvo gracias a la Ecuación 11.

$$CRA = \frac{Pht - Pst}{Pht} * 100 \text{ (Ecuación 11)}$$

Donde:

CRA = Contenido relativo de agua (%)

Pht = Peso húmedo del tejido (g)

Pst = Peso seco del tejido (g)

4.11 Análisis de costos

Seguidamente, en el Cuadro 8 se muestra la lista de costos para la presente investigación. Se observa que el costo total da como resultado un valor de ₡6,190,000.00.

En este proyecto no es necesario el cálculo de un VAN y un TIR debido a que como se mencionó anteriormente, el VAN es la diferencia entre el dinero que entra a una empresa o el disponible para un proyecto y el monto que se invierte en el mismo proyecto. Y en este caso al ser una investigación a cargo de una estudiante, solo se cuenta con el monto invertido en la investigación. Además, no hay una manera por la cual se pueda remunerar el dinero invertido y empezar a obtener beneficios en esta investigación. Por consiguiente, no se puede calcular el TIR ya que es la tasa de descuento de un proyecto que se analiza para considerarlo como apto.

Sin embargo, estos valores son menester y deben de ser calculados cuando se investigue sobre la productividad del cultivo al poner en práctica los modelos estadísticos de transpiración para tener una mayor eficiencia del agua, es decir, si los resultados de la investigación se aplican a la producción de chile Dulcético.

Cuadro 8. Lista de costos para la investigación propuesta.

ID	Descripción de actividad	Sub total
1	Limpieza general y desmonte	¢400,000.00
2	Preparación del terreno de cada planta	¢700,000.00
3	Bolsas de polietileno	¢80,000.00
4	Mecates	¢100,000.00
5	8 vagonetas de suelo	¢640,000.00
6	Plántulas	¢100,000.00
7	Abono para todo el ciclo de la plantación en el invernadero	¢200,000.00
8	Estudio de suelos	¢120,000.00
9	Sistema de riego con mano de obra incluida	¢2,000,000.00
10	Diseño del sistema de riego	¢750,000.00
11	Mano de obra de la investigación	¢600,000.00
12	Mantenimiento	¢500,000.00
Total		¢6,190,000.00

4.12 Análisis ambiental

Para la evaluación del impacto ambiental (EIA) se utilizó el método Arboleda. Los parámetros de evaluación que se valoró en cada impacto son: Clase (C), Presencia (P), Duración (D), Evolución (E), y Magnitud (M). En el Cuadro 9 se observan de los rangos para realizar la clasificación. También, dichos impactos se analizaron con los parámetros: físicos, bióticos y sociales.

La Clase (C) define el sentido del cambio ambiental producido por una determinada acción del proyecto, el cual puede ser: Positivo (+) si mejora la condición ambiental analizada o negativo (-) si la desmejora.

Cuadro 9. Rangos que se utilizan para la clasificación de los criterios aplicados en la EIA por Arboleda

PRESENCIA	DURACIÓN	EVOLUCIÓN	MAGNITUD	PUNTAJE
Cierta	Muy larga o permanente (> 10 años)	Muy rápida (< 1mes)	Muy alta (Mr > a 80%)	1,0
Muy probable	Larga (> 7 años y < 10 años)	Rápida (> 1 mes y < 12 meses)	Alta (> 60 % y < 80 %)	0,7 < 0,99
Probable	Media (> 4 años y < 7 años)	Media (> 12 meses y < 18 meses)	Media (> 40 % y < 60 %)	0,4 < 0,69
Poco Probable	Corta (>1 años y < 4 años)	Lenta (> 18 meses y < 24 meses)	Baja (> 20 % y < 40 %)	0,2 < 0,39
No probable	Muy corta (< 1 año)	Muy lenta (> 24 meses)	Muy baja (< 19%)	0,01<0,19

Fuente: (Arboleda, 2008)

Con ayuda de la Ecuación 12 se calculó la clasificación ambiental (Ca) y con el Cuadro 10 se clasifico el impacto ambiental.

$$Ca = C (P * [7 * E* M + 3 * D]) \text{ (Ecuación 12)}$$

donde:

Ca: Clasificación ambiental

C: Clase

P: Presencia

E: Evolución

M: Magnitud

D: Duración

El valor absoluto de Ca estará entre 0 y 10, siendo mayor a cero y menor o igual que 10. Seguidamente, se formuló un plan de manejo y mitigación para evitar el impacto dado.

Cuadro 10. Rangos de clasificación que indican la importancia del impacto de acuerdo con los resultados numéricos obtenidos.

Clasificación Ambiental (puntos)	Importancia del Impacto Ambiental
≤ 2,5	Poco significativo o irrelevante
> 2,5 y ≤ 5,0	Moderadamente significativo o moderado
> 5,0 y ≤ 7,5	Significativo o relevante
> 7,5	Muy significativo o grave

Fuente: (Arboleda, 2008)

4.13 Análisis social

En este caso se respondieron las preguntas que se mencionaron en el apartado anterior: ¿Quiénes son los beneficiarios de este proyecto?, ¿De qué manera se benefician con el proyecto? y ¿Qué otros impactos sociales generan este proyecto?

5.RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Estudio del suelo

Los resultados del estudio del suelo se pueden observar en el Cuadro 11. Se muestra una textura de suelo franco arenosa y una densidad aparente de $1,40 \text{ g/cm}^3$. La densidad aparente concuerda con los datos mostrados en el Cuadro 5. Referente a estudios realizados con anterioridad donde se observan los rangos en el que puede variar la densidad aparente con respecto a la textura de suelo.

Cuadro 11. Resultados del estudio de suelo

Textura del suelo	Franco arenoso
Dap (g/cm^3)	1,40
CC (%)	17,61
PMP (%)	9,79

La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente fueron calculados con las ecuaciones mostradas en el apartado anterior. La manera más adecuada para obtener estos valores es utilizando el método de las ollas de presión. No obstante, los valores de capacidad de campo y el punto de marchitez permanente entran en el rango mostrado en el Cuadro 6.

Estos parámetros nos muestran que siempre se tuvo una buena humedad en el suelo y, por lo tanto, disminuye la posibilidad de que se presenten restricciones en la transpiración debido a un déficit hídrico. Además, mencionar que se regaba tres veces por semana.

Para la regresión múltiple, la variable respuesta es la transpiración de las hojas según su altura y horario de medición. Mientras que las variables explicativas son:

- Humedad relativa de la planta (HR planta): %
- Temperatura de la planta (T planta): °C
- Humedad relativa del invernadero (HR invernadero): %
- Temperatura del invernadero (T invernadero): °C
- Radiación solar (RS): W/m^2
- Radiación fotosintéticamente activa (PAR): $\text{umol/m}^2/\text{s}$

Importante mencionar que, para cada modelo estadístico, las variables deben de ir con su respectiva unidad.

5.2 Hojas Altas

5.2.1 Horario de medición: 6am a 8am

Con ayuda del programa estadístico Minitab 18 se realizó un análisis de Grubbs para observar si se encontraban valores atípicos en las variables a estudiar.

La única variable que presento valores anormales fue la transpiración de las hojas altas en este horario de medición. Además, la primera prueba de Grubbs se muestra en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Primera prueba de valores atípicos: Transpiración de las hojas altas (6am-8am)

Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
Transpiración (mmol/m ² s)	144	68,02	46,45	6,30	231,20	3,51	0,048

Valor atípico

Variable	Valor atípico
Transpiración (mmol/m ² s)	231,2

Seguidamente, se muestra la Figura 14 donde se puede ver de una mejor manera el valor atípico (color rojo), los valores cercanos a él y el resto de conjunto de datos (de color azul).

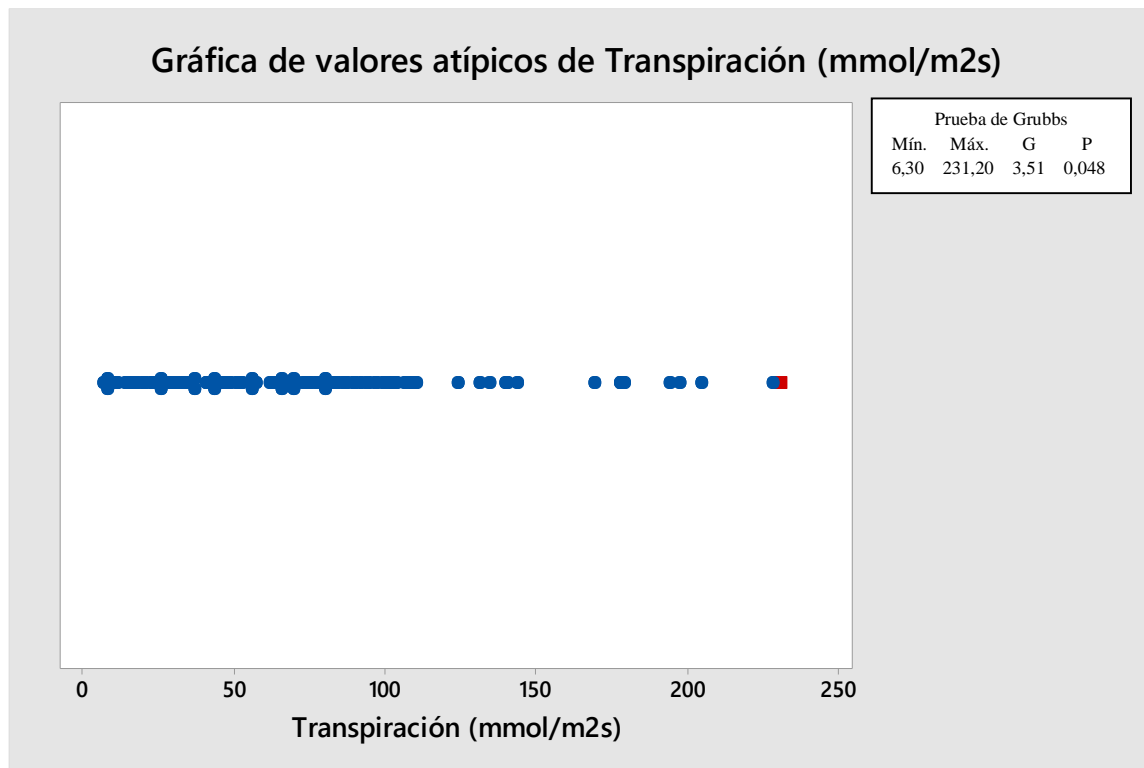


Figura 14. Gráfica de valores atípicos de transpiración de las hojas altas (6am-8am)

Se eliminó del estudio el valor atípico (231,2 mmol/m²s) mostrado en el Cuadro 9 y se volvió a analizar los valores de transpiración por Grubbs.

En el Cuadro 13 se puede ver otro valor atípico encontrado. El programa estadístico no recomienda realizar esto porque puede ser que la prueba Grubbs muestre un valor atípico que en realidad no lo sea. Sin embargo, en este caso ambos valores son cercanos (231,2 mmol/m²s y 228 mmol/m²s) y en la Figura 14 se observa como estos valores sí se alejan de la mayoría de los datos.

Cuadro 13. Segunda prueba de valores atípicos: Transpiración de las hojas altas (6am-8am)

Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
Transpiración (mmol/m ² s)	143	66,88	44,54	6,30	228,00	3,62	0,031

Valor atípico

Variable	Valor atípico
Transpiración (mmol/m ² s)	228

En la Figura 15 se muestra la gráfica de la segunda prueba de valores atípicos para la variable respuesta. También para comprobar lo anterior se realizó otra prueba de Grubbs, sin los datos anteriores de transpiración y la respuesta a la prueba se observa en el Cuadro 14.

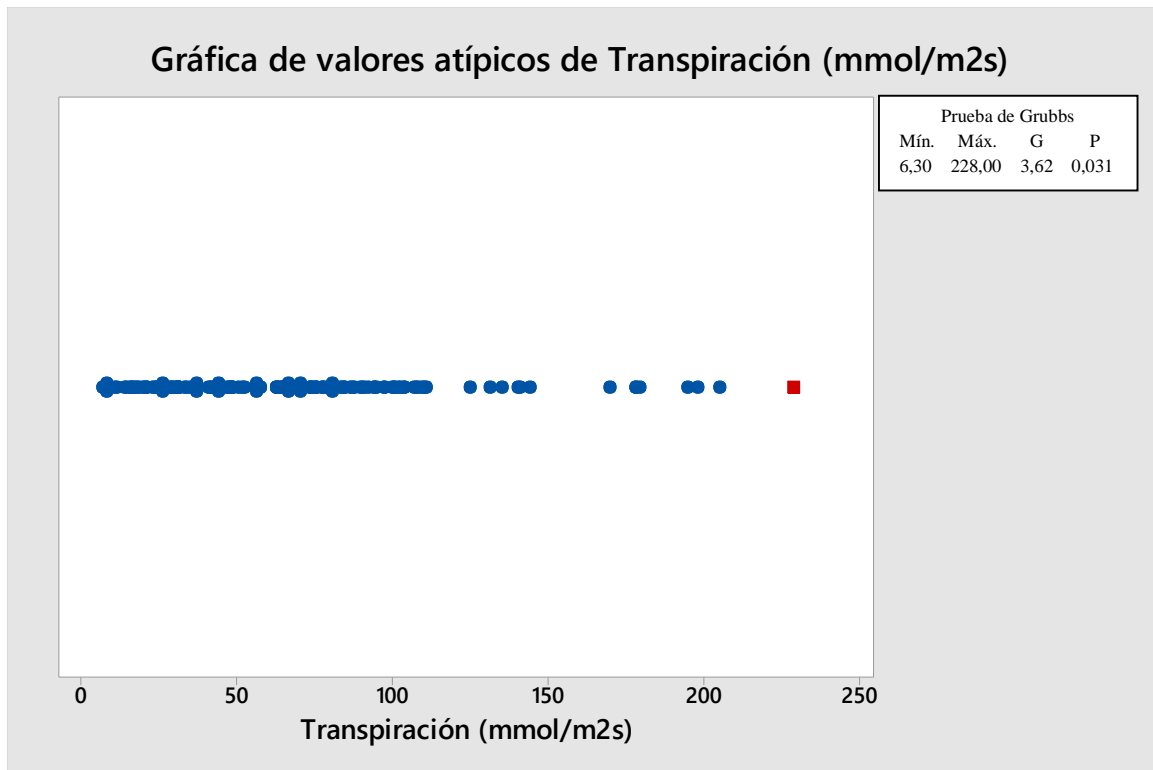


Figura 15. Segunda gráfica de valores atípicos de la transpiración de las hojas bajas (6am-8am)

En el Cuadro 14 se observa que el valor de p (valor de probabilidad) da un resultado mayor que el nivel de significancia, por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula y se concluye que no hay valores atípicos con un nivel de significancia del 5%.

Cuadro 14. Tercera prueba de valores atípicos: Transpiración de las hojas altas (6am-8am)

Método							
Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal						
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico						
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$						
Prueba de Grubbs							
Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
Transpiración (mmol/m ² s)	142	65,75	42,58	6,30	204,60	3,26	0,128
* NOTA * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%							

Dicho lo anterior, se realizaron los siguientes análisis y la regresión múltiple sin incluir los valores atípicos mencionados anteriormente para evitar errores y que se den respuestas que no permitan caracterizar el proceso en estudio.

Seguidamente, se realizó un análisis de correlación entre las variables que se muestra en el Cuadro 15. Se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson porque se hace necesario un instrumento que determine la fuerza y el sentido de la posible relación lineal existente entre las variables (Lahura, 2003). Y como se mencionó anteriormente, si las variables se pueden expresar como una combinación lineal se dice que hay problemas de multicolinealidad.

En el Cuadro 15 se observa primero los coeficientes de correlación y seguidamente debajo de ellos, el valor p (valor de probabilidad).

Si el valor de p es menor al 5%, se dice que la correlación es estadísticamente significativa y se concluye que la correlación es diferente de cero. Si es mayor al 5%, se dice que la correlación no es estadísticamente significativa y no se puede concluir que la correlación es diferente a cero.

Hecha esta salvedad, se puede ver como el PAR presenta una relación lineal en sentido negativo con la HR planta y la HR del invernadero, por lo que cuando una variable aumenta la

otra disminuye. Con la T planta, T invernadero y RS presenta un sentido positivo por lo que las variables tienen a aumentar y disminuir a la vez.

Cabe señalar, que si se compara los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos del PAR con el Cuadro 1 se obtiene lo siguiente: El PAR presenta una relación lineal entre moderada y fuerte con la HR de la planta, una relación lineal entre fuerte y perfecta con la T de la planta, T del invernadero, HR del invernadero y la RS.

También se puede ver como para todas las correlaciones el valor p (valor de probabilidad) es menor que el 5% (valor de significancia) por lo que todas las correlaciones son estadísticamente significativas.

Cuadro 15. Primeras correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-6am-8am)

	HR planta	T planta	T invernadero	HR invernadero	RS
T planta	-0,791				
	0,000				
T invernadero	-0,609	0,888			
	0,000	0,000			
HR invernadero	0,556	-0,843	-0,868		
	0,000	0,000	0,000		
RS	-0,522	0,844	0,960	-0,820	
	0,000	0,000	0,000	0,000	
PAR	-0,537	0,854	0,971	-0,813	0,985
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Se procedió a realizar la primera prueba de componentes principales entre la RS y el PAR ya que estas variables explicativas presentan el coeficiente de correlación más elevado. Esto se realizó con el fin de observar cuál es la variable que representa el mayor porcentaje de variabilidad de la varianza total. (Cuadro 16)

Cuadro 16. Análisis de componente principal entre RS y PAR (hojas altas-6am-8am)

Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación

Valor propio	1,9852	0,0148
Proporción	0,993	0,007
Acumulada	0,993	1,000

Vectores propios

Variable	PC1	PC2
RS	0,707	0,707
PAR	0,707	-0,707

En el Cuadro 17 se puede ver como el primer componente principal (RS) representa el 99% de la varianza total. Lo que quiere decir, que la RS va a explicar mayormente el efecto de ambas variables, por consiguiente, se eligió excluir el PAR del análisis ya que presenta una proporción de la varianza muy pequeña (0,7%). Es un principio del análisis de componentes principales que se tome simplemente aquel componente principal que explique la mayor variabilidad de los datos.

Seguidamente, se volvió a realizar las correlaciones entre las variables explicativas sin el PAR para observar el comportamiento que se presentaba en ellas sin incluir esta variable. (Cuadro 17)

Cuadro 17. Segundas correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-6am-8am)

	HR planta	T planta	T invernadero	HR invernadero
T planta	-0,791			
	0,000			
T invernadero	-0,609	0,888		
	0,000	0,000		
HR invernadero	0,556	-0,843	-0,868	
	0,000	0,000	0,000	
RS	-0,522	0,844	0,960	-0,820
	0,000	0,000	0,000	0,000

En el Cuadro 17 se observa como la RS y la T del invernadero presentan el coeficiente de Pearson más elevado, por lo tanto, estas son las variables que se analizan en la segunda prueba de componentes principales. (Cuadro 18)

Cuadro 18. Análisis de componente principal entre la RS y la T del invernadero (hojas altas-6am-8am)

Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación

	Valor propio	1,9605	0,0395
	Proporción	0,980	0,020
	Acumulada	0,980	1,000

Vectores propios

	Variable	PC1	PC2
	RS	0,707	-0,707
	T invernadero	0,707	0,707

En el Cuadro 18 se observa que el PC1 (RS) representa el 98% de la varianza total, además, se muestra la misma situación presentada en el Cuadro 16. Por lo que se decidió eliminar la variable T del invernadero para evitar problemas de colinealidad, además, de que presenta una proporción de la varianza igual a 2%.

Se volvió a realizar el proceso anterior y en el Cuadro 19 se muestra la tercera prueba de correlaciones sin la variable explicativa T del invernadero.

Cuadro 19. Terceras correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-6am-8am)

	HR planta	T planta	HR invernadero
T planta	-0,791		
	0,000		
HR invernadero	0,556	-0,843	
	0,000	0,000	
RS	-0,522	0,844	-0,820
	0,000	0,000	0,000

Además, se realizó el análisis de componentes principales para la RS y la T de la planta ya que tienen un coeficiente de relación lineal entre fuerte y perfecto (Cuadro 19). En este caso se decidió eliminar la T de la planta ya que presenta el menor valor de proporción de la varianza.

Cuadro 20. Análisis de componente principal para la RS y la T de la planta (hojas altas-6am-8am)

Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación

Valor propio	1,8440	0,1560
Proporción	0,922	0,078
Acumulada	0,922	1,000

Vectores propios

Variable	PC1	PC2
RS	0,707	-0,707
T planta	0,707	0,707

Descartada la variable anterior, en el Cuadro 21 se muestra la cuarta prueba de correlaciones entre las variables explicativas. Se puede ver cómo sigue apareciendo una fuerte correlación lineal entre ciertas variables. En este caso, la RS y la HR del invernadero que presentan una relación lineal entre fuerte y perfecta en sentido negativo.

Cuadro 21. Cuartas correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-6am-8am)

	HR planta	HR invernadero
HR invernadero	0,556	
	0,000	
RS	-0,522	-0,820
	0,000	0,000

Se vuelve a repetir el proceso y en el Cuadro 22 se observa el análisis de componentes principales para la RS y la HR del invernadero. Se decidió eliminar la HR del invernadero y en el Cuadro 23 se observa la quinta prueba de correlación entre las variables restantes.

Cuadro 22. Análisis de componentes principales entre la RS y la HR del invernadero (hojas altas-6am-8am)

Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación

Valor propio	1,8203	0,1797
Proporción	0,910	0,090
Acumulada	0,910	1,000

Vectores propios

Variable	PC1	PC2
RS	-0,707	-0,707
HR invernadero	0,707	-0,707

En el Cuadro 23 se observa la correlación entre la RS y la HR de la planta. Este coeficiente comparado con el Cuadro 1, nos dice que la relación lineal es entre moderada y fuerte con sentido negativo. Por lo que estas son las variables que se someten al análisis de regresión lineal múltiple. Ya que estas no presentan problemas de multicolinealidad y, por lo tanto, el análisis anterior nos evita el resultado de pruebas erróneas. Mencionar, además, que se involucró en el análisis la interacción entre ambas variables y la RS al cuadrado para observar si se presentaba significancia con la variable respuesta.

Cuadro 23. Quinta correlación entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-6am-8am)

Correlación de Pearson	-0,522
Valor p	0,000

Para identificar si un predictor influye en la variable respuesta se tiene el valor p. Un valor p menor a 0,05 ($p < 0,05$) nos indica que el predictor tiene una adición significativa en el modelo. Y un valor de p mayor a 0,05 ($p > 0,05$) sugiere que los cambios en el predictor no están asociados con los cambios de la variable respuesta (en este caso la transpiración), por lo tanto, el predictor es no significativo.

En el Cuadro 24 se puede ver el análisis de varianza para la transpiración de las hojas altas en este horario. Se observa como la RS tiene significancia interactuando con la HR de la planta en la transpiración de las hojas altas, pero no presento significancia al cuadrado.

Cuadro 24. Análisis de varianza para la transpiración de las hojas altas (6am-8am)

Fuente	GL	SC	MC	Valor	Valor p
		Ajust.	Ajust.	F	
Regresión	3	173026	57675,3	96,38	0,000
HR planta	1	21891	21891,4	36,58	0,000
RS	1	1969	1968,6	3,29	0,072
RS*HR planta	1	4337	4337,5	7,25	0,008
Error	138	82577	598,4		
Falta de ajuste	122	65594	537,7	0,51	0,980
Error puro	16	16983	1061,4		
Total	141	255603			

El coeficiente de determinación obtenido del análisis estadístico a través de Minitab 18 dio un resultado un valor de 67,69% y nos dice que los predictores significativos explican el 67,69% de la variabilidad de la transpiración.

Por consiguiente, en el Cuadro 25 se muestra la ecuación de regresión para las hojas altas en un horario de 6 am a 8 am obtenido del análisis estadístico a través de Minitab 18. Se observa que la HR de la planta presenta el coeficiente más elevado y, por lo tanto, es la variable que mayor influencia presenta en la variable respuesta.

Cuadro 25. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (6am-8am)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	-402,6 + 4,873 HR planta – 0,836 RS + 0,01429 RS*HR planta
---------------------------------------	---	--

Avanzando en nuestro razonamiento, se muestran las gráficas del comportamiento de cada variable explicativa significativa con la variable respuesta. En cada gráfica se observa el promedio de la transpiración (Promedio), el límite inferior (Li), el límite superior (Ls) y sus respectivas tendencias.

En la Figura 16 se muestra la gráfica de la HR planta versus la transpiración de las hojas altas. Se observa como en los extremos la variabilidad de la transpiración no es tan prolongada como en el medio, además, gracias a las tendencias del Li y del Ls se puede decir que cuando la HR de la planta aumenta, la variabilidad de la transpiración es menor.

Los rangos de variación se deben a que la HR planta interactúa con la RS y al mismo la interacción de estas dos variables, como se muestra en la ecuación del Cuadro 25.

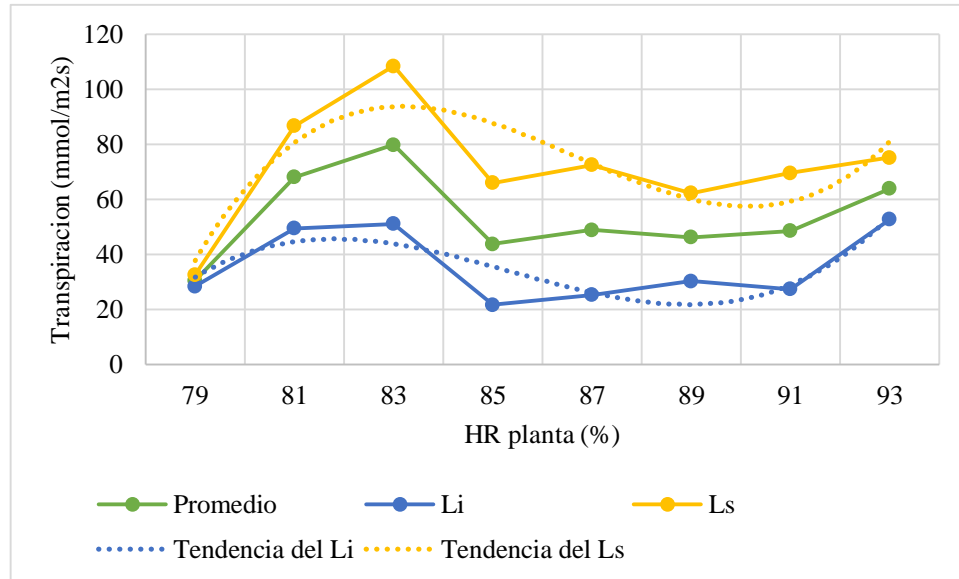


Figura 16. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas altas (6am-8am)

A continuación, en la Figura 17 se muestra la gráfica de radiación solar y transpiración de las hojas altas en este horario de medición. La variabilidad de la transpiración se debe a que las demás variables significativas actúan simultáneamente con la variable graficada, como se presenta en el modelo estadístico propuesto.

En este caso, las tendencias del Li y Ls nos dicen que cuando aumenta la radiación solar, la variabilidad de la transpiración es mayor.

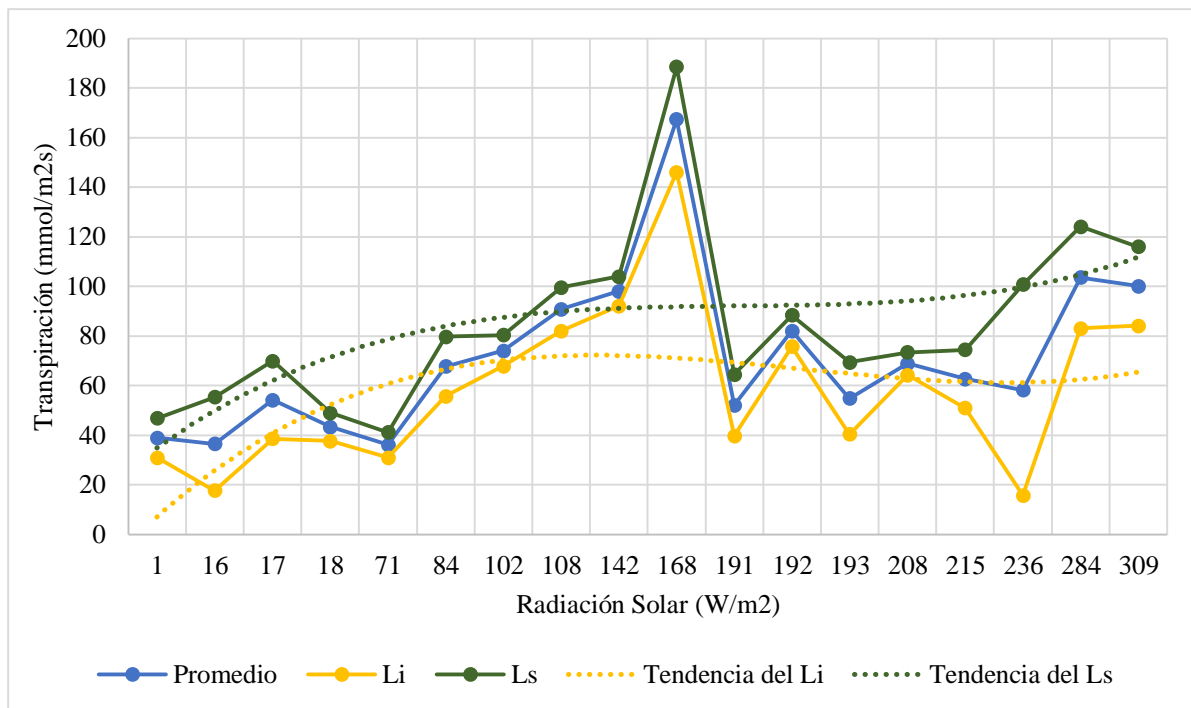


Figura 17. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (6am-8am)

El siguiente aspecto trata sobre el análisis de medias que se le realizó a la transpiración medida con el instrumento y la transpiración calculada con ayuda de la ecuación de regresión múltiple (Cuadro 25).

En el Cuadro 26 se puede ver el análisis de ANOVA de un solo factor para la transpiración experimental y teórica. Se observa como el valor p es mayor que el nivel de significancia (5%), por lo que se concluye que las medias son iguales. Es decir, se acepta la hipótesis nula.

Hay que mencionar, además, que en el Cuadro 27 se muestra el intervalo de confianza del 95% para las medias de cada transpiración. Se puede ver como los intervalos son muy similares, por lo que se concluye que la transpiración calculada es igual a la transpiración medida con el instrumento (porómetro), por lo tanto, el modelo matemático encontrado es un buen predictor y representante del comportamiento de la planta con respecto a la transpiración. Se debe agregar, que el valor de probabilidad del modelo estadístico es del 99%.

Cuadro 26. Análisis de ANOVA de un solo factor para la transpiración experimental y calculada de las hojas altas (6am-8am)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	2	Transpiración experimental (mmol/m ² s); Transpiración calculada (mmol/m ² s)

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	0	0,20	0,00	0,991
Error	282	428507	1519,53		
Total	283	428507			

Cuadro 27. Intervalos de confianza del 95% para las medias de la transpiración experimental y calculada (hojas altas-6am-8am)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración (mmol/m ² s)	142	65,75	42,58	(59,31; 72,19)
T calculada (mmol/m ² s)	142	65,70	35,02	(59,26; 72,14)

Para los siguientes horarios de medición y para cada altura de hoja, se realizó la misma metodología que se mostró en el horario de 6 am a 8 am en las hojas altas. De manera resumida se dice:

Para la mayoría de los horarios la única variable que mostró valores atípicos fue la transpiración. Es decir, las variables explicativas no mostraron valores atípicos. Y, por consiguiente, estos valores extraños fueron eliminados del análisis.

Para todos los horarios y diferentes alturas de hoja, se realizó el análisis de multicolinealidad con la matriz de correlación de Pearson y la prueba del análisis de componentes principales. Se realizó un análisis del Cuadro 1, 2 y 3, y se decidió tomar como

límite un valor de 0,69 (interpretación del coeficiente de Pearson), por lo que se concluye que las correlaciones arriba de este valor presentan una correlación fuerte, por lo tanto, las variables que presenten una correlación mayor a este valor se someten al análisis de componentes principales. Seguidamente, se excluyó del análisis la variable que presentaba la menor variabilidad de varianza total entre ambas.

Debido a lo anterior, se va a presentar para cada horario y altura de hoja de planta la matriz de correlaciones que presenten relaciones lineales moderadas, débiles, escasas o nulas entre las variables explicativas. Ya que como se ha venido mencionando, se quiere evitar problemas de una fuerte relación lineal entre las variables para que no se dé como resultado una matriz sin inversa o el aumento entre las varianzas. Estas variables son las que se involucran en el análisis de regresión múltiple.

Hecha esta salvedad, también, para cada horario de medición de altura de hoja se va a mostrar el coeficiente de determinación y la ecuación de regresión múltiple obtenido gracias al programa estadístico Minitab 18 y las gráficas de cada variable explicativa significativa en el modelo estadístico.

La variabilidad que presenta cada gráfica se debe a que no solamente se encuentra influyendo la variable explicativa significativa graficada, sino que también simultáneamente se encuentran influyendo las demás variables descritas en cada modelo estadístico propuesto (Como se mencionó anteriormente).

Importante mencionar que cada prueba de ANOVA de un solo factor para la transpiración experimental y la transpiración calculada dio un valor p mayor que el nivel de significancia (5%), por lo tanto, se concluye que la transpiración experimental es igual a la transpiración calculada con el modelo estadístico propuesto. En este caso, para cada altura de hoja y horario se va a mostrar el cuadro de intervalo de confianza del 95% de diferencia de medias para confirmar la similitud obtenida en las medias y el valor de probabilidad del modelo.

5.2.2 Horario de medición: 9am a 11am

En el Cuadro 28 se puede ver la correlación entre la RS y la HR del invernadero. Se presenta una relación entre moderada y fuerte con sentido negativo, según el Cuadro 1 y,

además, entra dentro del límite moderado (0,69) que se mencionó anteriormente analizando los cuadros de interpretación del coeficiente de Pearson (Ver Cuadro 3).

Cuadro 28. Correlación entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas altas-9am-11am)

Correlación de Pearson	-0,522
Valor p	0,000

Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a realizar el análisis de regresión múltiple con las variables anteriores y en el Cuadro 29 se observa la ecuación de regresión múltiple para las hojas altas de 9 am a 11 am.

En este horario la HR del invernadero presenta significancia con la ecuación de transpiración de las hojas altas (diferencia con la ecuación de la transpiración de las hojas altas en el horario de 6 am a 8 am, ya que en estas es la HR de la planta la que presenta significancia). La semejanza es que la RS sigue influyendo en la transpiración en el horario de 9 am a 11 am.

Este modelo presenta un coeficiente de determinación con un valor de 34,48%. Lo que quiere decir, que los predictores significativos explican el 34,48% de la variabilidad de la transpiración de las hojas altas. Comparando este coeficiente de determinación con el Cuadro 4, llegamos a la conclusión de que tenemos un R^2 malo. Ya que se encuentra entre el rango de 0,3 a 0,4 (igual a 30% a 40%). Sin embargo, el modelo es adecuado como se verá más adelante.

En la ecuación de regresión múltiple el coeficiente más elevado lo presenta la HR del invernadero, por lo que es la variable explicativa más influyente.

Cuadro 29. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (9am-11am)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	211,4 – 1,508 HR invernadero – 0,469 RS + 0,00720 RS*HR invernadero
---------------------------------------	---	---

Por otra parte, se muestra el comportamiento de cada variable explicativa significativa con la variable respuesta.

En la Figura 18 se observa el comportamiento de la humedad relativa del invernadero con la variable respuesta. La HR del invernadero presenta significancia interactuando con la RS.

Si se observa todo el comportamiento se puede decir que a manera que aumenta la HR del invernadero, la variabilidad de la transpiración es menor.

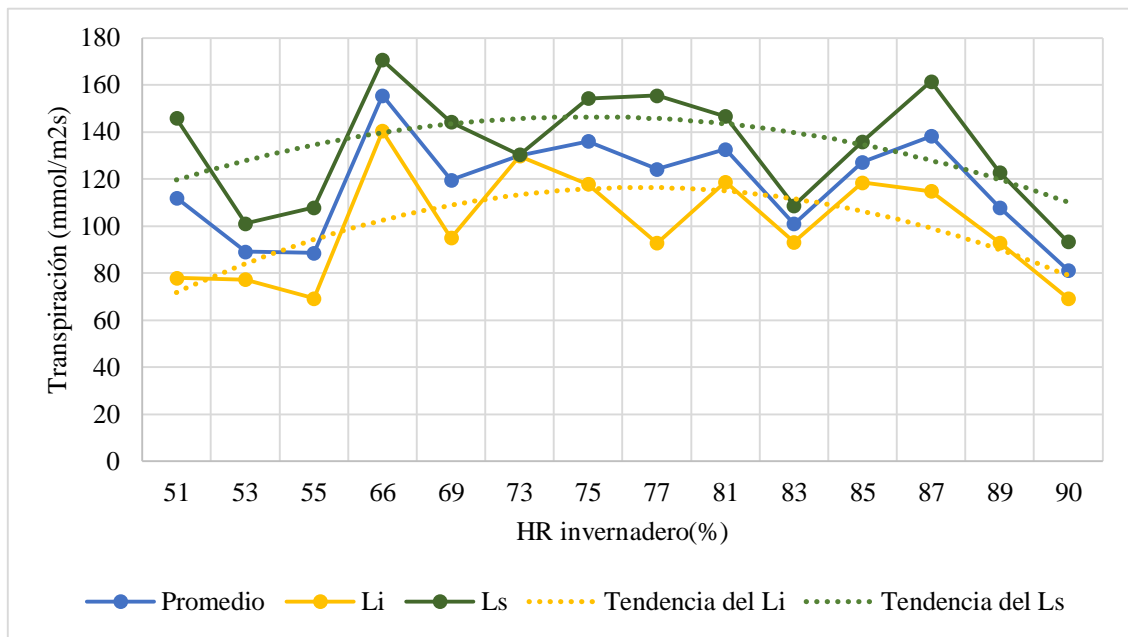


Figura 18. Gráfica de la humedad relativa del invernadero versus la transpiración de las hojas altas (9am-11 am)

Seguidamente, se puede ver la gráfica de la radiación solar y la transpiración de las hojas altas en este horario de medición en la Figura 19.

Se observa como al aumentar la radiación solar la variabilidad de la transpiración es mayor. Esta variabilidad de la transpiración de las hojas altas de 9am a 11am presenta el mismo comportamiento con respecto a la RS de 6am a 8am.

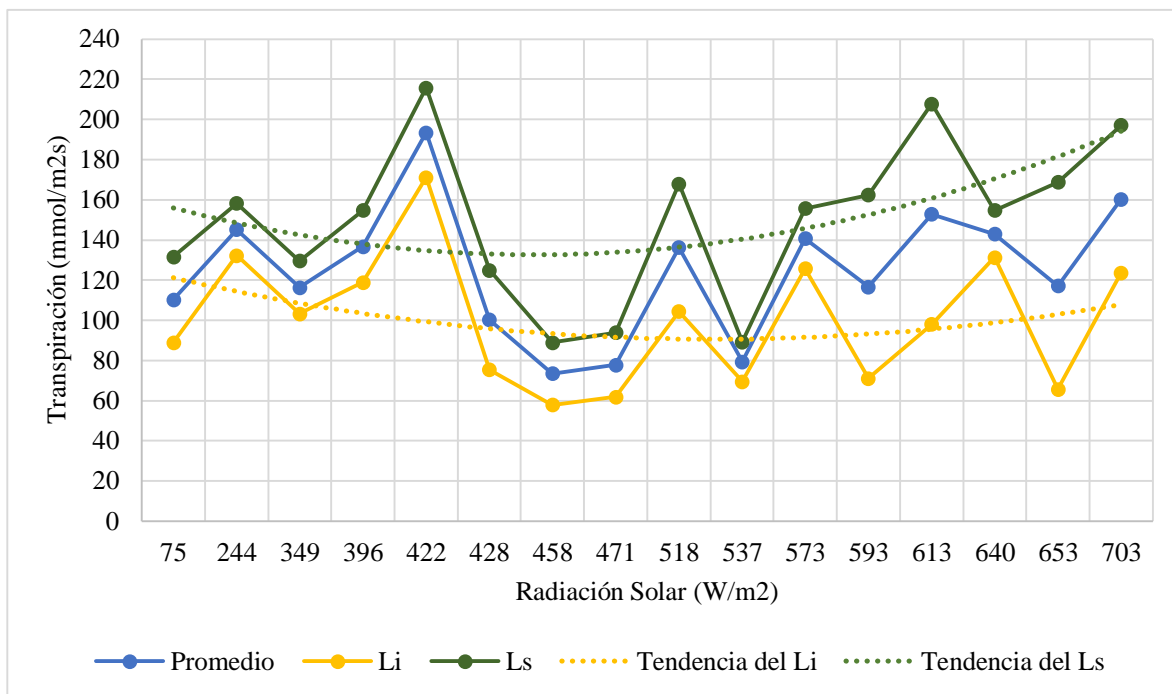


Figura 19. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (9am-11am)

Por lo que se refiere a la prueba de ANOVA de un solo factor, se observa el Cuadro 30 que muestra el intervalo de confianza del 95% de medias de la transpiración medida con el instrumento y la calculada con la ecuación vista en el Cuadro 29. Por lo que se confirma que las medias son muy similares (una diferencia de 0,07 mmol/m²s) y el modelo es adecuado. La probabilidad del modelo estadístico es del 98%.

Cuadro 30. Intervalo de confianza del 95% para las medias de la transpiración experimental y la calculada (hojas altas-9am-11am)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración (mmol/m ² s)	144	112,96	36,63	(108,03; 117,88)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	144	113,03	21,52	(108,10; 117,95)

5.2.3 Horario de medición: 1pm a 3pm

A continuación, en el Cuadro 31 se muestran las variables explicativas que presentan entre ellas un coeficiente de Pearson con una relación lineal moderada o débil para poder cerciorarnos que no haya problemas de multicolinealidad en la regresión múltiple.

Cuadro 31. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-1pm-3pm)

	T planta	T invernadero
T invernadero	0,430	
	0,000	
RS	-0,439	0,313
	0,000	0,000

A causa de lo anterior, se incluyen en el análisis de regresión múltiple solamente las variables mencionadas. En el Cuadro 32 se observa la ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas de 1 pm a 3 pm.

La T del invernadero presenta significancia interactuando junto con la T de la planta y también con la RS. Lo dicho anteriormente, es la diferencia que se presenta con la ecuación de la transpiración de las hojas altas de 9 am a 11am. Ya que en el horario de 9 am a 11 am, la T del invernadero y la T de la planta no presentan significancia con la variable respuesta.

Se presenta, en este caso, que el coeficiente de determinación explica que los predictores influyen un 27,41% en la variable respuesta. Comparando este valor con el Cuadro 4, se dice que se tiene un coeficiente de determinación malo.

Además, en la ecuación se puede ver como el coeficiente de la T del invernadero es el más elevado. Por consiguiente, es la variable más influyente.

Cuadro 32. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (1pm-3pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	-3448 + 98,6 T planta + 126,9 T invernadero + 1,025 RS – 0,0349 RS*T invernadero - 3,55 T invernadero*T planta
---------------------------------------	---	---

Todas estas observaciones se relacionan también con las gráficas que se muestran a continuación:

En primer lugar, en la Figura 20 se observa la gráfica del comportamiento de la T de la planta y la transpiración de las hojas altas en este horario de medición.

En este comportamiento se puede ver como la variabilidad de la transpiración es mayor entre una T de la planta de 25°C a 32°C. En los extremos la variabilidad de la transpiración es menor.

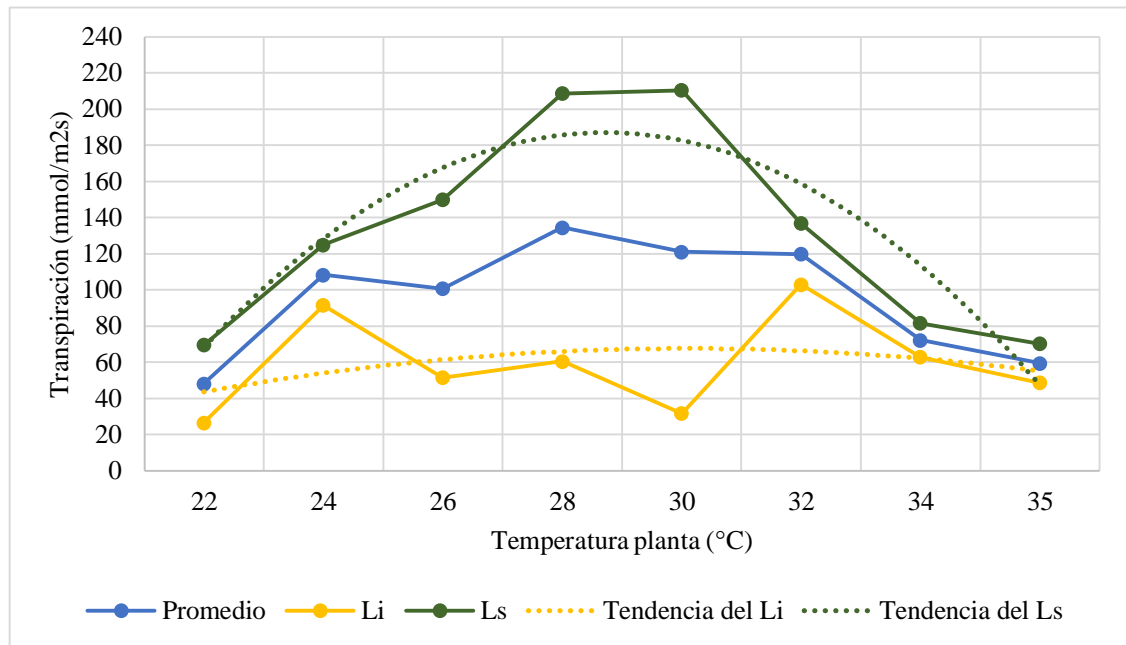


Figura 20. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas altas (1pm-3pm)

En segundo lugar, en la Figura 21 se observa el comportamiento de la temperatura del invernadero y la transpiración de las hojas altas en este horario. Esta variable influye significativamente con la variable respuesta interactuando con la T de la planta y la RS.

Se observa como las tendencias de los límites superior e inferior nos dice que con forme aumenta la T del invernadero la variabilidad de la transpiración es menor.

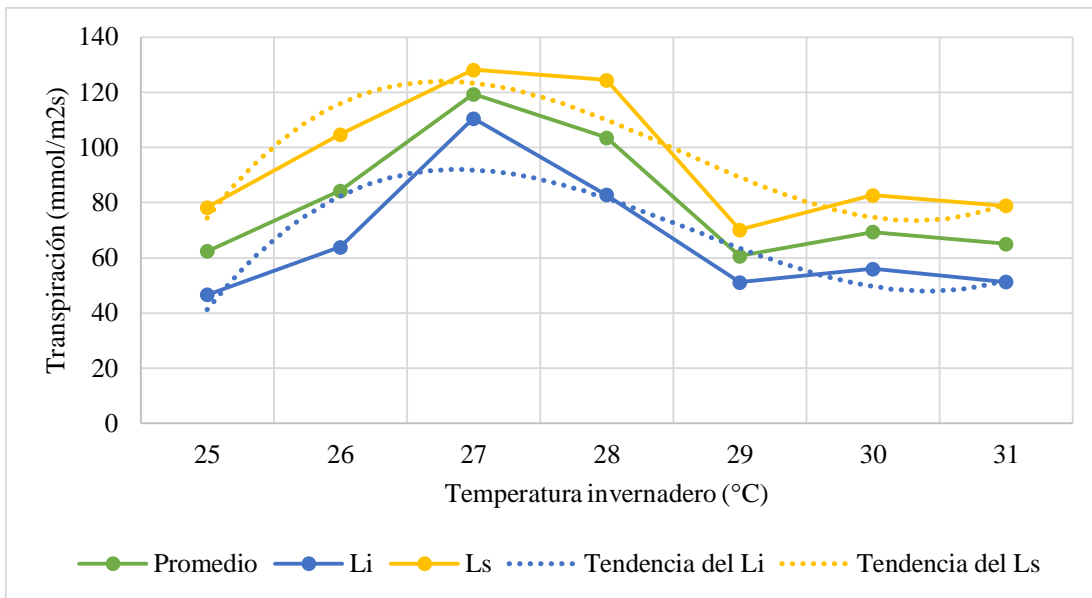


Figura 22. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas altas (1pm-3pm)

Por último, en la Figura 22 se observa la gráfica de radiación solar y la variable respuesta de las hojas altas en este horario de medición. Esta variable explicativa presenta significancia interactuando con la T del invernadero.

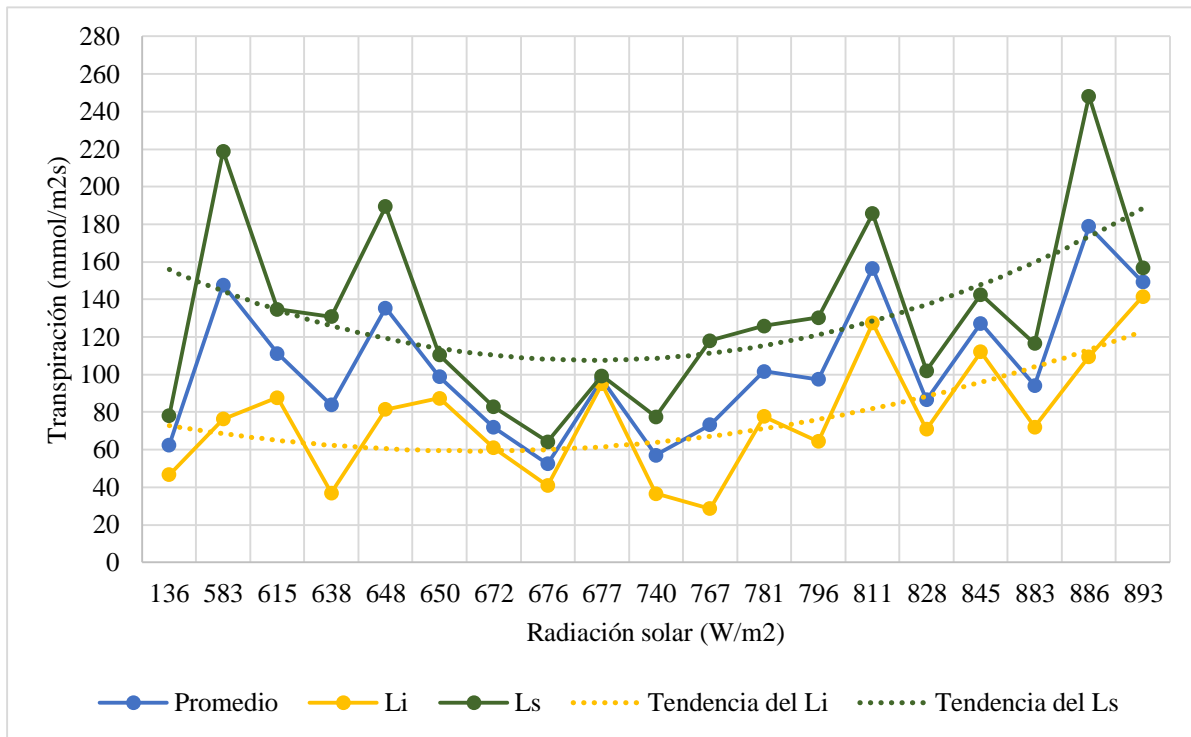


Figura 21. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (1pm-3pm)

Se puede ver como con forme aumenta la radiación solar la variabilidad de la transpiración disminuye, diferencia que se presenta con la radiación solar y la variabilidad de la transpiración de las hojas altas en el horario de 9am a 11am, ya que en estas la variabilidad es mayor cuando aumenta la radiación solar.

Se debe agregar, que en el Cuadro 33 se observa que el modelo es adecuado ya que la media de la transpiración medida con el porómetro solo presenta una diferencia de 3,01 mmol/m²s con la transpiración calculada con la ecuación propuesta para este horario y altura de medición. La probabilidad del modelo estadístico es del 45%.

Cuadro 33. Intervalos de confianza del 95% para las medias de la transpiración experimental y la calculada (hojas altas-1pm-3pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración (mmol/m ² s)	144	100,15	42,31	(94,62; 105,67)
T calculada (mmol/m ² s)	144	103,16	21,90	(97,63; 108,68)

5.2.4 Horario de medición: 3pm a 5pm

Seguidamente, en el Cuadro 34 se observa la relación lineal moderada entre las variables explicativas: RS y HR de la planta.

Cuadro 34. Correlaciones entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas altas-3pm-5pm)

Correlación de Pearson	0,642
Valor p	0,000

Prosiguiendo con nuestro análisis, en el Cuadro 35 se muestra la ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas en este horario de medición. En este caso se presentan las mismas variables significativas que se obtuvieron en el horario de 6 am a 8 am (Cuadro 25).

Se debe agregar que el coeficiente de determinación tiene un valor de 47,39%. Por lo que los predictores significativos explican la variable respuesta en ese porcentaje. Si se compara este coeficiente de determinación con lo que dice la literatura (Cuadro 4), tenemos un coeficiente de determinación regular. Además, la HR de la planta presenta el coeficiente más elevado en la ecuación.

Cuadro 35. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (3pm-5pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	-203,4 + 3,572 HR planta + 0,382 RS – 0,00498 RS*HR planta
---------------------------------------	---	--

Por otro lado, podemos ver en las siguientes figuras con el comportamiento de cada predictor significativo con la variable respuesta.

En la Figura 23 se observa la gráfica de la humedad relativa de la planta y la transpiración de las hojas altas en este horario. Se puede ver como la variabilidad de la transpiración aumenta con forme aumenta la HR de la planta. Diferencia que se presenta con la HR de la planta y la transpiración de las hojas altas en el horario de 6am a 8am, ya que en este último caso la variabilidad de la transpiración es menor con forme aumenta el porcentaje de HR de la planta (como se vio anteriormente, Figura 16).

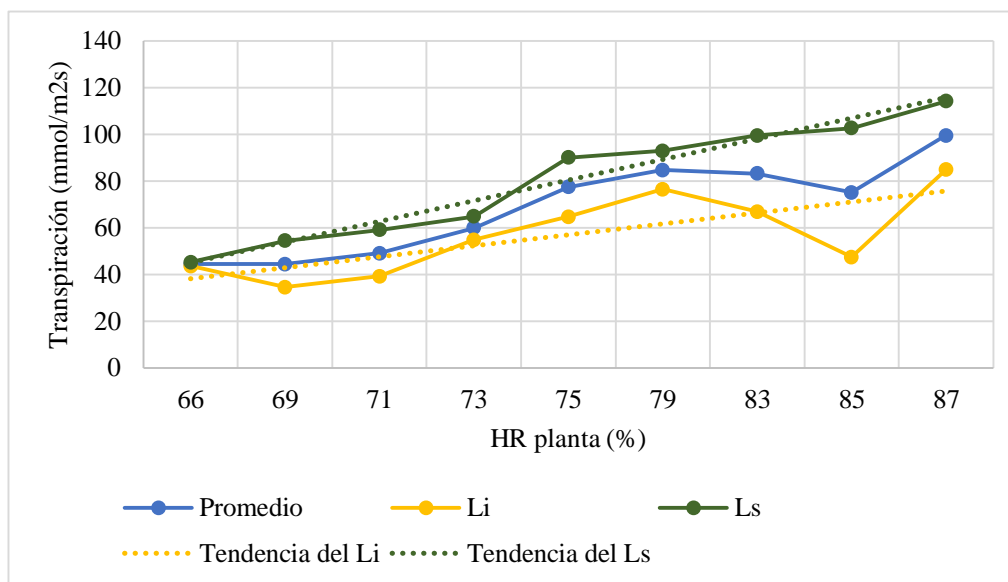


Figura 23. Gráfica de humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas altas (3pm-5pm)

En la Figura 24 se observa la gráfica de la radiación solar y la variable respuesta en este horario de medición. Esta variable presenta significancia con la variable respuesta interactuando con la HR de la planta. Se puede ver como la variabilidad de la transpiración es ligeramente menor con forme aumenta la RS, igual que en el horario anterior.

Seguidamente, en el Cuadro 36 se observan los intervalos de confianza del 95% para la media de la transpiración medida con el porómetro y la transpiración calculada con la ecuación de regresión múltiple. Se puede ver una diferencia de 0,18 mmol/m²s por lo que hay igualdad de medias y el modelo se ajusta adecuadamente. La probabilidad del modelo estadístico es del 94%.

Cuadro 36. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas altas-3pm-5pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	142	69,51	23,91	(66,12; 72,89)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	142	69,33	16,42	(65,95; 72,72)

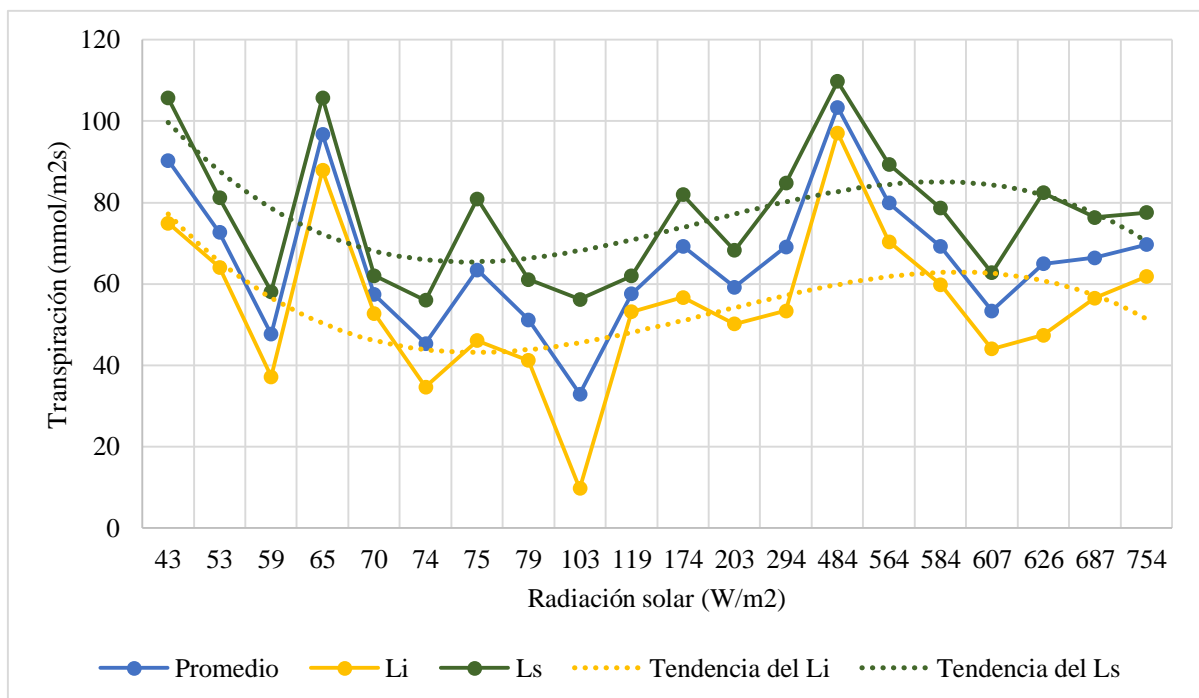


Figura 24. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (3pm-5pm)

5.3 Hojas Medias

5.3.1 Horario de medición: 6am a 8am

En el Cuadro 37 se observan los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables explicativas que no presentan una fuerte correlación entre ellas. La T de la planta y la

HR de la planta presentan una relación lineal escasa o nula, la RS presenta una relación lineal escasa con la HR de la planta y una relación lineal débil con la T de la planta.

Cuadro 37. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas medias-6am-8am)

	HR planta	T planta
T planta	-0,212	
	0,011	
RS	0,045	0,464
	0,590	0,000

Después de lo anterior, se procedió a realizar el análisis de regresión múltiple. En el Cuadro 38 se puede observar la ecuación de regresión múltiple y como la RS tiene una significancia cuadrática con la variable respuesta. Además, la T de la planta también presenta significancia con la variable respuesta e interactuando con la HR de la planta.

Lo anterior hace referencia a la diferencia que se presenta en la ecuación de la transpiración de las hojas medias con la ecuación de la transpiración de las hojas altas en este mismo horario de medición. Y se asemejan solamente en que en ambas ecuaciones se presenta la significancia de la interacción de la RS junto con la HR de la planta.

El coeficiente de determinación nos dice que con un valor de 86,66% los predictores significativos explican la variable respuesta (transpiración). En este caso la T de la planta presenta el coeficiente más elevado.

Cuadro 38. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (6am-8am)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	838 – 14,38 HR planta – 63,8 T planta – 3,029 RS + 0,000596 RS ² + 0,03307 RS*HR planta + 1,0004 HR planta*T planta
---------------------------------------	---	---

Hay que mencionar, además, que podemos observar el comportamiento de cada variable explicativa significativa con respecto a la variable respuesta por medio de rangos en las siguientes figuras:

En la Figura 25 se observa la gráfica de la HR de la planta y la transpiración. Se observa como con forme aumenta la HR de la planta desde un 79% a 93% el rango en el que varía la transpiración es mayor. En este caso la variabilidad de la transpiración de las hojas medias se comporta de manera contraria que la variabilidad de la transpiración de las hojas altas en este mismo horario de medición (Ver Figura 16).

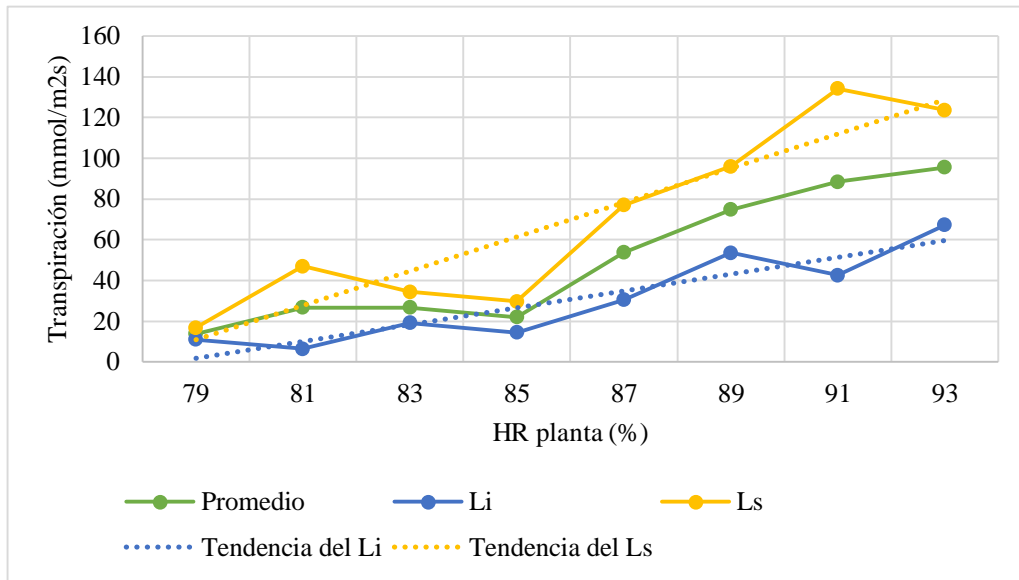


Figura 25. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (6am-8am)

Seguidamente, en la Figura 26 se muestra la gráfica de la temperatura de la planta y la variable respuesta. Se puede ver como aumenta el rango de variación de la transpiración con forme aumenta la T de la planta.

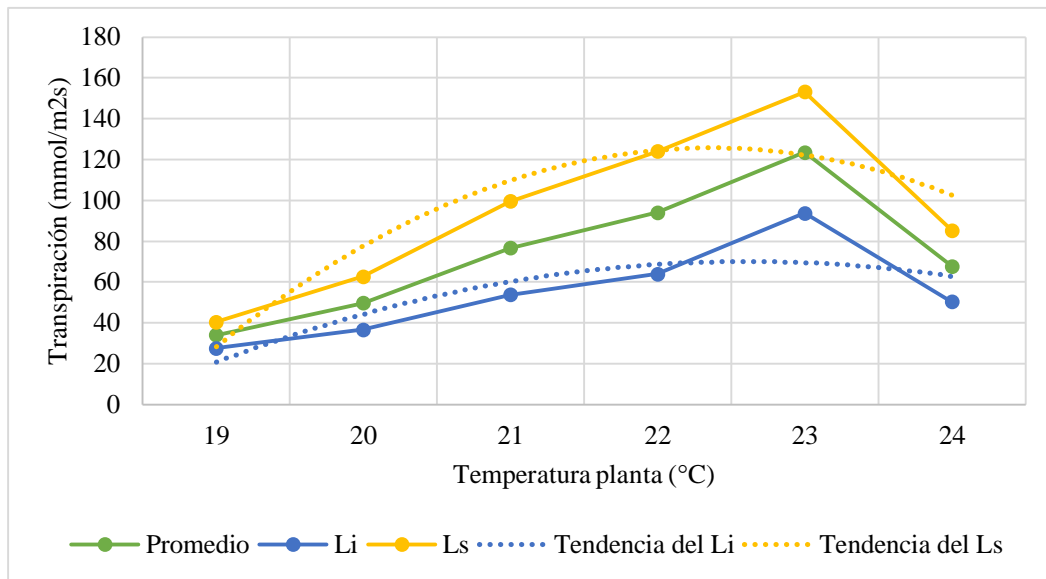


Figura 26. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas medias (6am-8am)

Prosiguiendo nuestro análisis, en la Figura 27 se puede ver la gráfica de la radiación solar y la transpiración de las hojas medias en este horario. La RS es una variable que muestra significancia con la variable respuesta y su forma cuadrática.

Se observa como con forme aumenta la RS la variabilidad de la transpiración es mayor. Este comportamiento se observa de manera similar que en el horario de medición de 6am a 8am en la transpiración de las hojas altas.

Seguidamente, en el Cuadro 39 se muestran los intervalos de confianza del 95% para la media de la transpiración medida con el porómetro y la transpiración calculada con la ecuación de regresión múltiple. Se observa una diferencia de 0,01 mmol/m²s, por lo tanto, las transpiraciones son iguales y el modelo se ajusta adecuadamente. La probabilidad del modelo estadístico es del 99%.

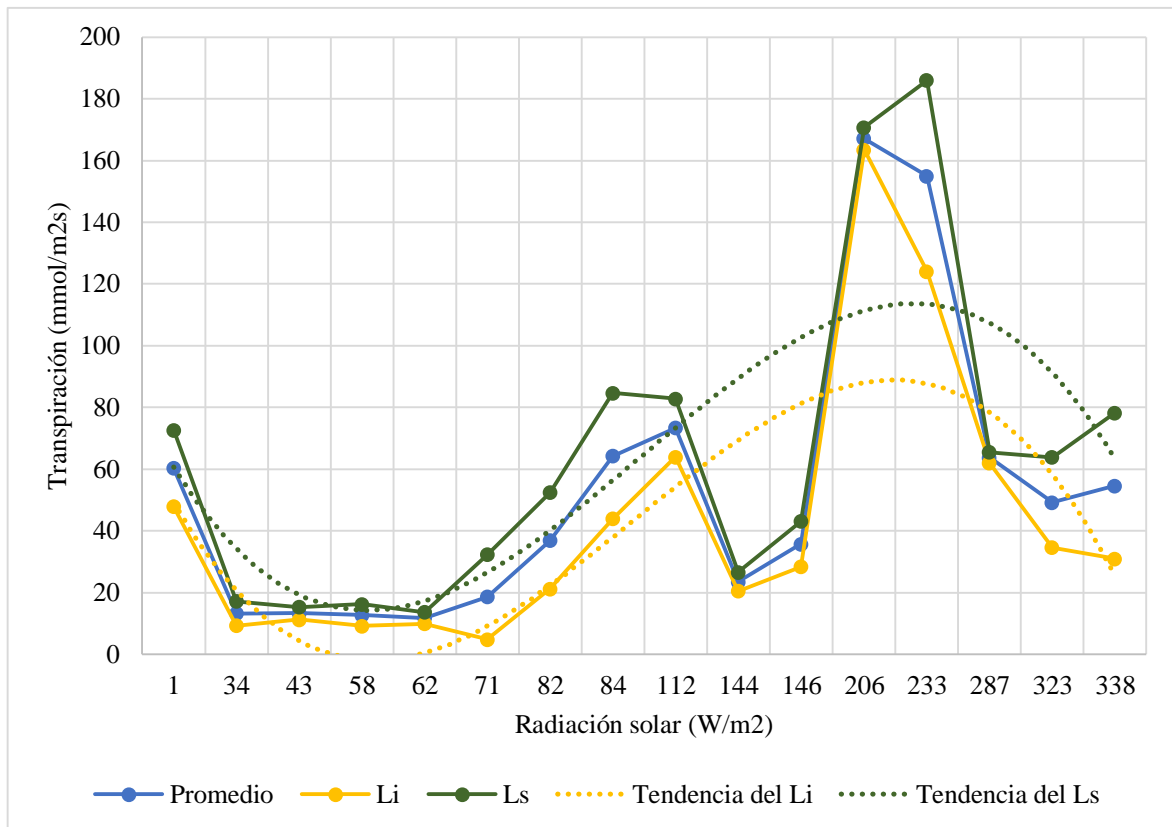


Figura 27. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas medias (6am-8am)

Cuadro 39. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas medias-6am-8am)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m²s)	144	58,05	47,68	(50,64; 65,46)
Transpiración calculada (mmol/m²s)	144	58,04	42,57	(50,62; 65,45)

5.3.2 Horario de medición: 9am a 11am

Consideremos ahora, el Cuadro 40 que nos presenta los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables explicativas que presentan una relación lineal entre moderada, débil o nula (Ver Cuadro 1, 2 y 3), con el propósito de evitar la multicolinealidad. Y como se mencionó anteriormente, estas son las variables que se someten al análisis de regresión múltiple.

Cuadro 40. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas medias-9am-11am)

	HR planta	T planta	HR invernadero
T planta	-0,417		
	0,000		
HR invernadero	0,245	-0,167	
	0,003	0,046	
RS	-0,001	-0,111	-0,689
	0,987	0,188	0,000

Hecha esta salvedad, en el Cuadro 41 se encuentra la ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias en el horario de 9 am a 11 am.

Se puede ver como la única interacción significativa con la variable respuesta es la HR del invernadero junto con la T de la planta. Esto es una diferencia con la ecuación de regresión múltiple de la transpiración de las hojas altas en este mismo horario ya que en las hojas altas influye la interacción de la RS junto con HR del invernadero. Y en este caso la RS no mostró significancia.

El coeficiente de determinación dio un valor de 74,46%. Y, por lo tanto, este valor se puede clasificar como un coeficiente de determinación bueno con respecto al Cuadro 4. Se observa en la ecuación que la temperatura de la planta es la variable que presenta el coeficiente más alto.

Cuadro 41. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (9am-11am)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	606 + 9,085 HR planta – 41,9 T planta – 24,37 HR invernadero + 0,852 HR invernadero*T planta
---------------------------------------	---	--

Avanzando en nuestro razonamiento, podemos ver a continuación las gráficas de comportamiento de cada variable explicativa significativa con el modelo estadístico de la transpiración de las hojas medias en este horario.

En primer lugar, en la Figura 28 podemos ver la gráfica de HR de la planta y la transpiración de las hojas medias de 9 am a 11 am.

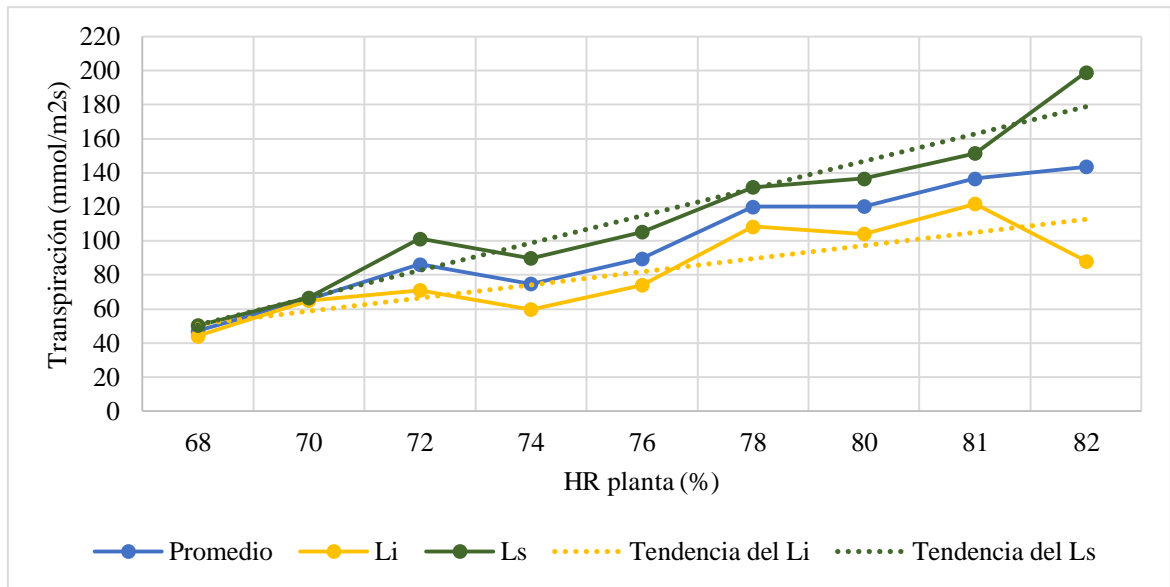


Figura 28. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (9am-11am)

Se observa que la variabilidad de la transpiración aumenta conforme aumenta la HR de la planta, sin embargo, los rangos de variación no son tan elevados. Es decir, el límite superior e inferior no se alejan mucho del promedio, con excepción del último intervalo de confianza mostrado en un HR de la planta de 82%.

En segundo lugar, en la Figura 29 se muestra la gráfica del comportamiento de la temperatura de la planta y la transpiración de las hojas medias.

Se puede decir que mientras aumenta la temperatura de la planta, también lo hace la variabilidad de la transpiración. Los intervalos de confianza no se alejan mucho del promedio, con excepción del último intervalo mostrado en una T de la planta de 31°C (como en la Figura 28).

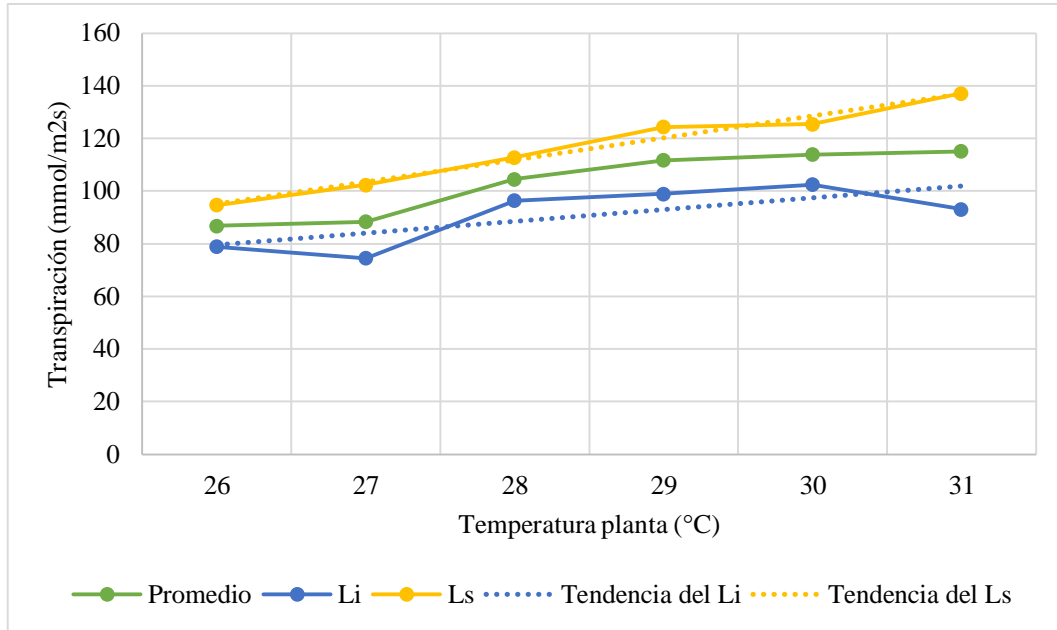


Figura 29. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas medias (9am-11am)

En último lugar, se observa el comportamiento de la HR del invernadero y la variable respuesta en la Figura 30.

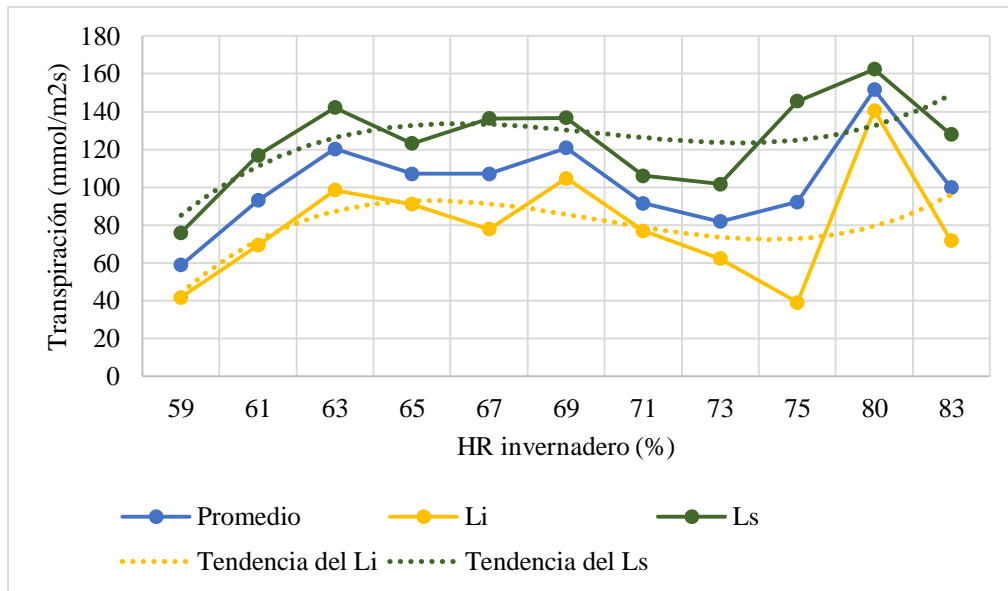


Figura 30. Gráfica de la humedad relativa del invernadero versus la transpiración de las hojas medias (9am-11am)

Se puede ver que como con forme aumenta la HR del invernadero la variabilidad de la transpiración es mayor. Diferencia que se presenta con el comportamiento de la variabilidad de la transpiración de las hojas altas en este mismo horario de medición, ya que en este último caso con forme aumenta la HR del invernadero la variabilidad de la variable respuesta es menor.

En el Cuadro 42 se muestran los intervalos de confianza del 95% de las medias de la transpiración experimental y teórica. Por lo que se concluye que el modelo es adecuado y, además, las medias se diferencian en un valor de 0,71 mmol/m²s. La probabilidad del modelo matemático propuesto es del 84%.

Cuadro 42. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y calculada (hojas medias-9am-11am)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	142	105,98	32,50	(100,97; 111,00)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	142	105,27	28,03	(100,26; 110,29)

5.3.3 Horario de medición: 1pm a 3pm

A continuación, en el Cuadro 43 se observan las correlaciones entre las variables explicativas que presenten relaciones lineales débiles, con el fin de evitar una matriz sin inversa o el aumento de las varianzas entre las variables. Por consiguiente, esas son las variables y las interacciones entre ellas que se someten al análisis de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias en este horario de medición.

Cuadro 43. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas medias-1pm-3pm)

	HR planta	T invernadero
T invernadero	-0,402	
	0,000	
RS	0,225	-0,332
	0,007	0,000

El siguiente aspecto trata sobre la ecuación de regresión múltiple y se muestra en el Cuadro 44. La interacción que muestra significancia con la variable respuesta es la T del invernadero junto con la HR de la planta.

En este mismo horario en la ecuación de la transpiración de las hojas altas, las interacciones que presentan significancia con la variable respuesta son: la RS junto con la T del invernadero y la T del invernadero junto con la T de la planta. Esta es la diferencia que se presenta con la ecuación de la transpiración de las hojas medias en este mismo horario. Ya que, como se mencionó anteriormente solo presenta significancia la pareja de la T del invernadero interactuando con la HR de la planta.

En este modelo el coeficiente de determinación presenta un valor de 81,25% (coeficiente de determinación bueno, según Cuadro 4). En este caso, la T del invernadero es la variable que presenta más influencia con la transpiración, debido a su alto coeficiente.

Cuadro 44. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (1pm-3pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	-3740 + 50,8 HR planta + 121,0 T invernadero + 0,07738 RS – 1,624 T invernadero*HR planta
---------------------------------------	---	---

Con respecto al comportamiento de cada variable explicativa significativa en el modelo estadístico de la transpiración de las hojas medias en este horario de medición se puede ver en las siguientes figuras:

En la Figura 31 se puede ver la gráfica del comportamiento de la HR de la planta y la variable respuesta. Se observa como la variabilidad de la transpiración es mayor en humedades relativas de la planta menores que 67% y mayores que 77%.

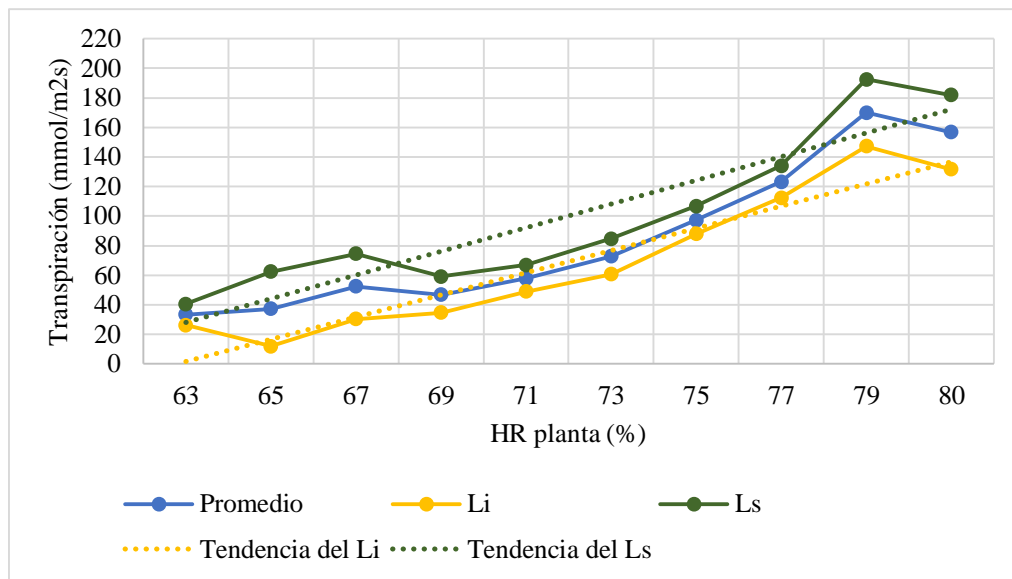


Figura 31. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (1pm-3pm)

Seguidamente, en la Figura 32 se puede observar el comportamiento de la temperatura del invernadero y la variable respuesta. Se puede ver como de variación de la variable respuesta es menor con forme aumenta la T de invernadero.

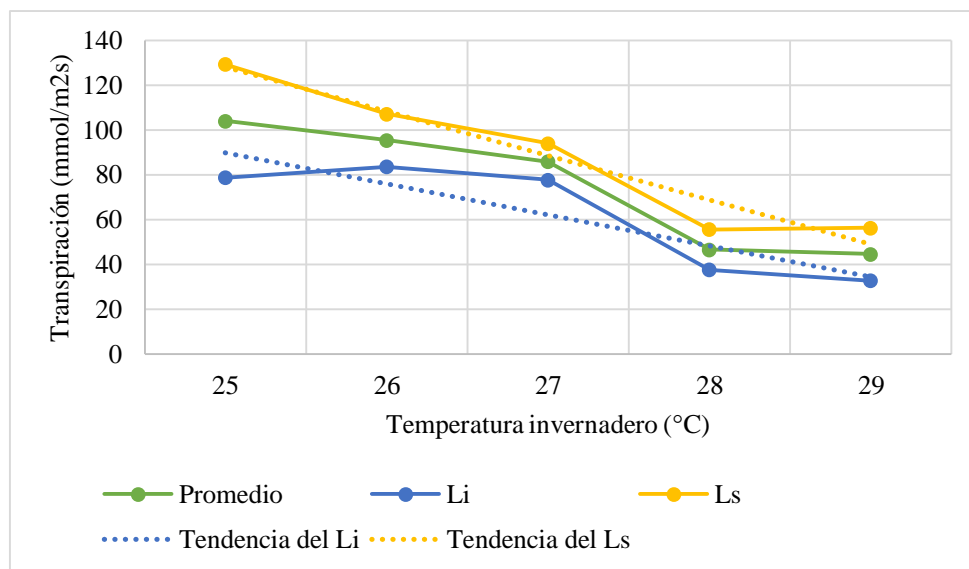


Figura 32. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas medias (1pm-3pm)

Ahora veamos el comportamiento de la radiación solar junto con la transpiración de las hojas medias en este horario de medición (Figura 33). Se observa como al aumentar la RS la variabilidad de la transpiración es mayor. En este caso el comportamiento de la variabilidad de la transpiración de las hojas medias es contrario que el comportamiento de la variabilidad de la transpiración de las hojas altas en este mismo horario de medición (Ver Figura 22).

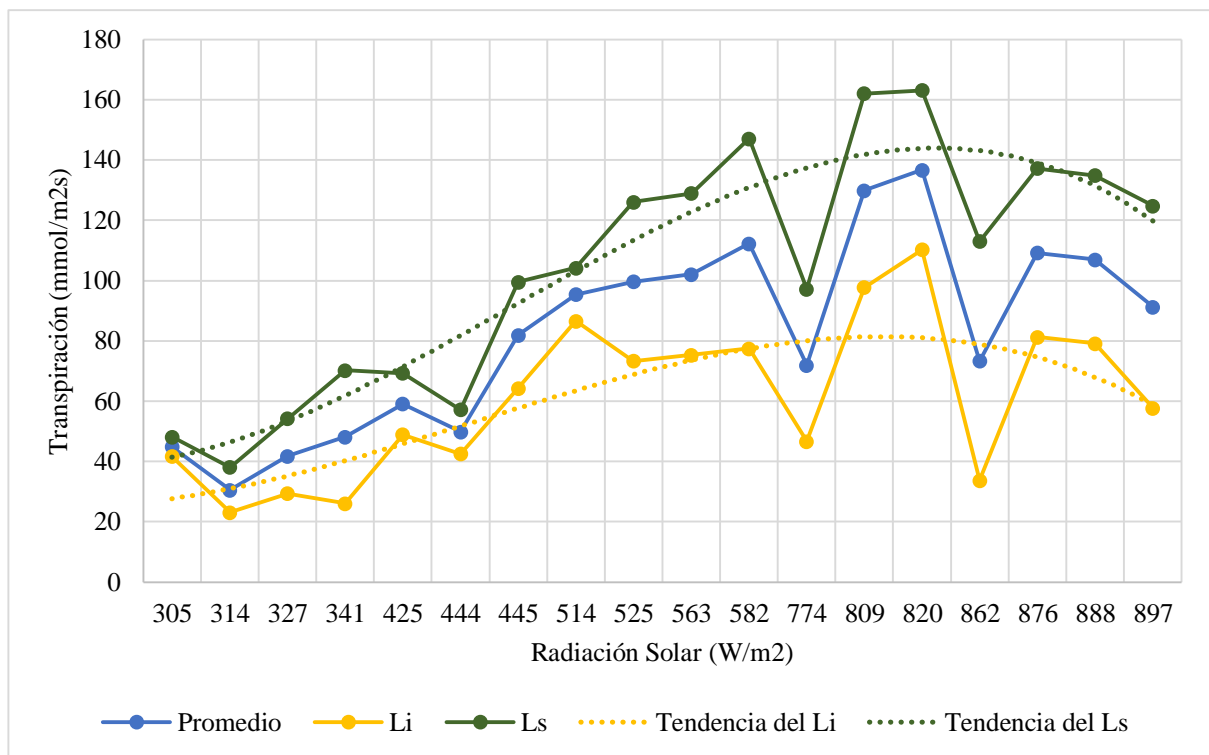


Figura 33. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas medias (1pm-3pm)

Seguidamente, en el Cuadro 45 se observan los intervalos de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la teórica. Se puede ver como el modelo estadístico es adecuado ya que se presenta una diferencia de 4,18 mmol/m²s con la transpiración medida con el porómetro y una probabilidad del 34%.

Cuadro 45. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas medias-1pm-3pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	142	85,57	38,39	(79,54; 91,59)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	142	81,39	34,46	(75,37; 87,42)

5.3.4 Horario de medición: 3pm a 5pm

Ahora veamos, en el Cuadro 46 la correlaciones entre las siguientes variables explicativas que presentan una relación lineal moderada: RS y la HR de la planta. De modo que estas son las variables que se involucran en el análisis de regresión múltiple.

Cuadro 46. Correlaciones entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas medias-3pm-5pm)

Correlación de Pearson	-0,590
Valor p	0,000

Prosiguiendo nuestro análisis, en el Cuadro 47 se muestra el modelo estadístico propuesto para la transpiración de las hojas medias en este horario de medición.

En este mismo horario la ecuación de la transpiración de las hojas altas presenta significancia con las siguientes variables explicativas: HR planta, RS y la interacción entre la HR planta y la RS (Como se vio anteriormente). Lo que quiere decir, que al pasar a la transpiración de las hojas medias (en este mismo horario), RS al cuadrado empieza a ser significativa para un modelo estadístico de regresión lineal múltiple.

El coeficiente de determinación dio como resultado un valor de 46,84% (coeficiente regular, según el Cuadro 4). Se observa como la HR de la planta presenta el mayor coeficiente (variable más influyente).

Cuadro 47. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (3pm-5pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	-532,5 + 7,013 HR planta + 1,145 RS – 0,000387 RS ² – 0,01081 RS*HR planta
---------------------------------------	---	---

Seguidamente, se muestran las gráficas de comportamiento de cada variable significativa en el modelo estadístico con la variable respuesta:

En primer lugar, en la Figura 34 se nos presenta el comportamiento de la HR de la planta y la transpiración de las hojas medias en este horario. Se observa como con forme aumenta la HR de la planta la variación de la transpiración es mayor. De manera similar ocurre este comportamiento de la variabilidad de la transpiración de las hojas altas con respecto a esta variable explicativa (en este mismo horario de medición, ver Figura 23).

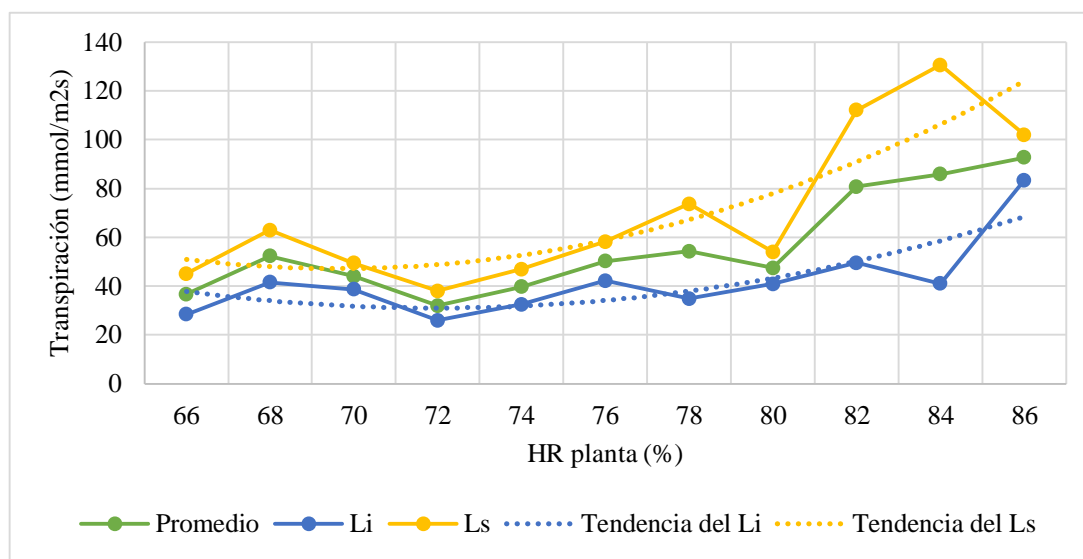


Figura 34. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (3pm-5pm)

Y finalmente, en la Figura 35 se observa la gráfica de radiación solar y la transpiración de las hojas medias en este horario de medición. El mayor rango de variación de la transpiración se da en radiaciones solares menores o mayores.

Hay que mencionar, además, que en el Cuadro 48 se observan los intervalos de confianza del 95% para la media de la transpiración medida con el porómetro y la calculada con la ecuación vista en el Cuadro 47. Se observa una diferencia de 0,01 mmol/m²s entre ellas, por lo que se concluye que hay igualdad de medias y el modelo es adecuado con una probabilidad del 99%.

Cuadro 48. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y calculada (hojas medias-3pm-5pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m²s)	143	55,81	27,04	(52,00; 59,63)
Transpiración calculada (mmol/m²s)	143	55,82	18,50	(52,00; 59,63)

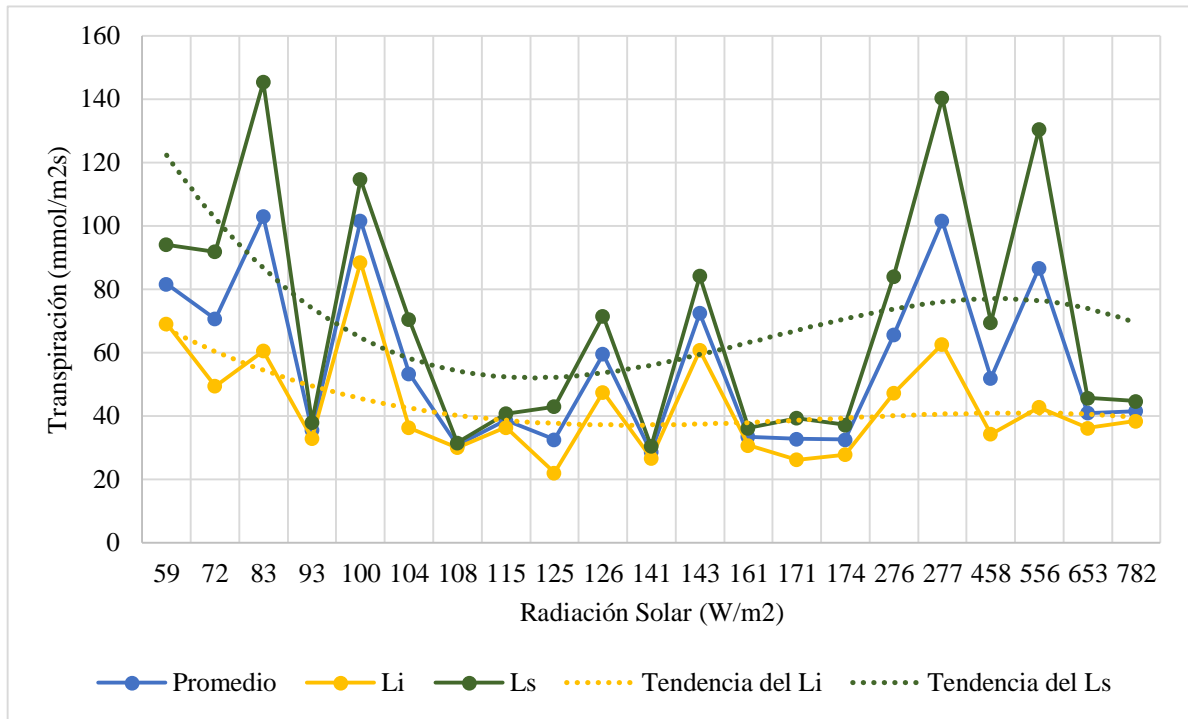


Figura 35. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas medias (3pm-5pm)

5.4 Hojas Bajas

5.4.1 Horario de medición: 6am a 8am

A continuación, en el Cuadro 49 se observa el coeficiente de Pearson de las variables que se incorporan en la regresión múltiple, ya que después del análisis mencionado anteriormente por la matriz de correlaciones y el estudio de componentes principales, las variables que no presentan una alta colinealidad son: HR de la planta y la RS.

Cuadro 49. Correlación entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas bajas-6am-8am)

Correlación de Pearson	-0,167
Valor p	0,048

De manera que en el Cuadro 50 se presenta la ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas en este horario.

En este mismo horario la RS presentan significancia con ecuación de la transpiración de las hojas altas y medias (en este mismo horario de medición), por lo que de esta manera se observa una semejanza con la transpiración de las hojas bajas. Y se diferencia de la ecuación de la transpiración de las hojas medias (Cuadro 38) porque en esta la T de la planta presenta significancia con la variable respuesta y en la ecuación de la transpiración de las hojas bajas en el horario de 6 am a 8 am, no.

El coeficiente de determinación nos dice que los predictores significativos explican el 32,52% de la transpiración de las hojas bajas en el horario de 6 am a 8 am. Si el coeficiente de determinación se compara con los valores del Cuadro 4, se dice que tenemos un coeficiente malo para la regresión múltiple (Sin embargo, el modelo es adecuado como se observará más adelante). Además, Se observa en la ecuación que el coeficiente más elevado lo presenta la HR de la planta.

Cuadro 50. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (6am-8am)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	-1142 + 14,88 HR planta + 1,289 RS + 0,001335 RS ² – 0,02391 RS*HR planta
---------------------------------------	---	--

En relación con el comportamiento de cada variable explicativa significativa con la transpiración de las hojas bajas en este horario se muestran en las siguientes figuras:

En la Figura 36 se observa la gráfica de la HR de la planta y la transpiración de las hojas bajas en este horario. Se puede ver como con forme aumenta la HR de la planta la variabilidad de la transpiración es mayor. Este mismo comportamiento se observa en la variabilidad de la transpiración de las hojas medias con respecto a esta misma variable (en el mismo horario de medición).

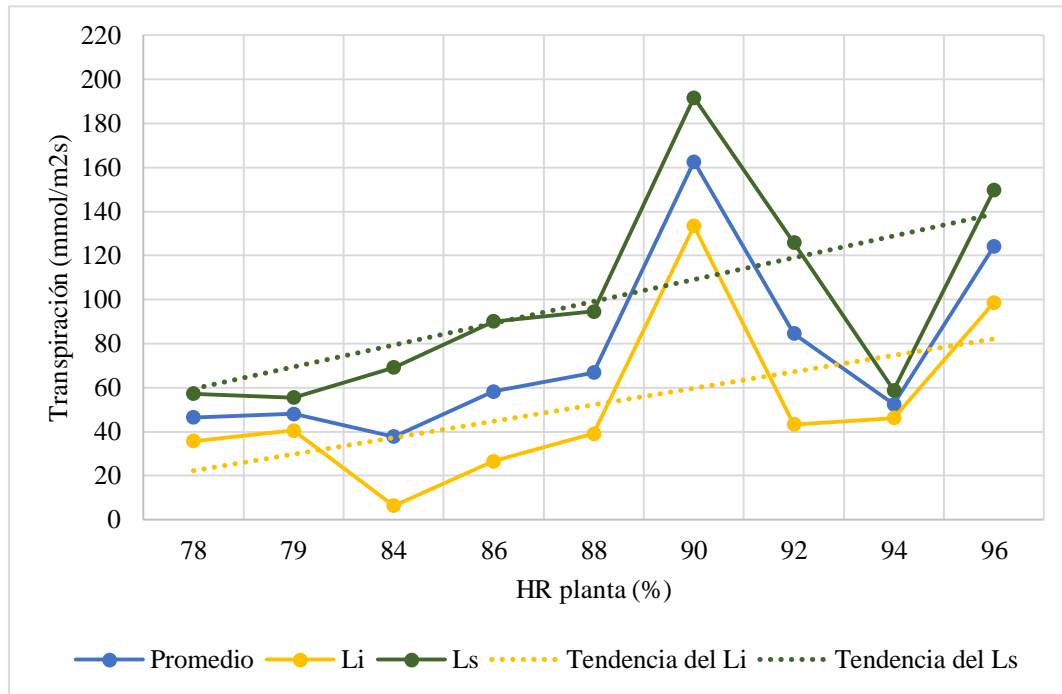


Figura 36. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (6am-8am)

Seguidamente, en la Figura 37 se puede ver la gráfica del comportamiento de la radiación solar y la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición. Se observa que conforme aumenta la radiación solar la variabilidad de la transpiración es menor. Diferencia que se presenta con la variabilidad de la transpiración de las hojas medias con respecto a la RS en este mismo horario de medición, ya que el comportamiento de la variación es de forma contraria.

A continuación, en el Cuadro 51 se observa el intervalo de confianza del 95% para cada media de transpiración en estudio (experimental y teórica). Se muestra una diferencia de 0,15 mmol/m²s, por consiguiente, se dice que el modelo es adecuado y posee una probabilidad del 98%.

Cuadro 51. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas bajas-6am-8am)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	141	92,58	67,01	(83,53; 101,62)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	141	92,43	38,19	(83,39; 101,47)

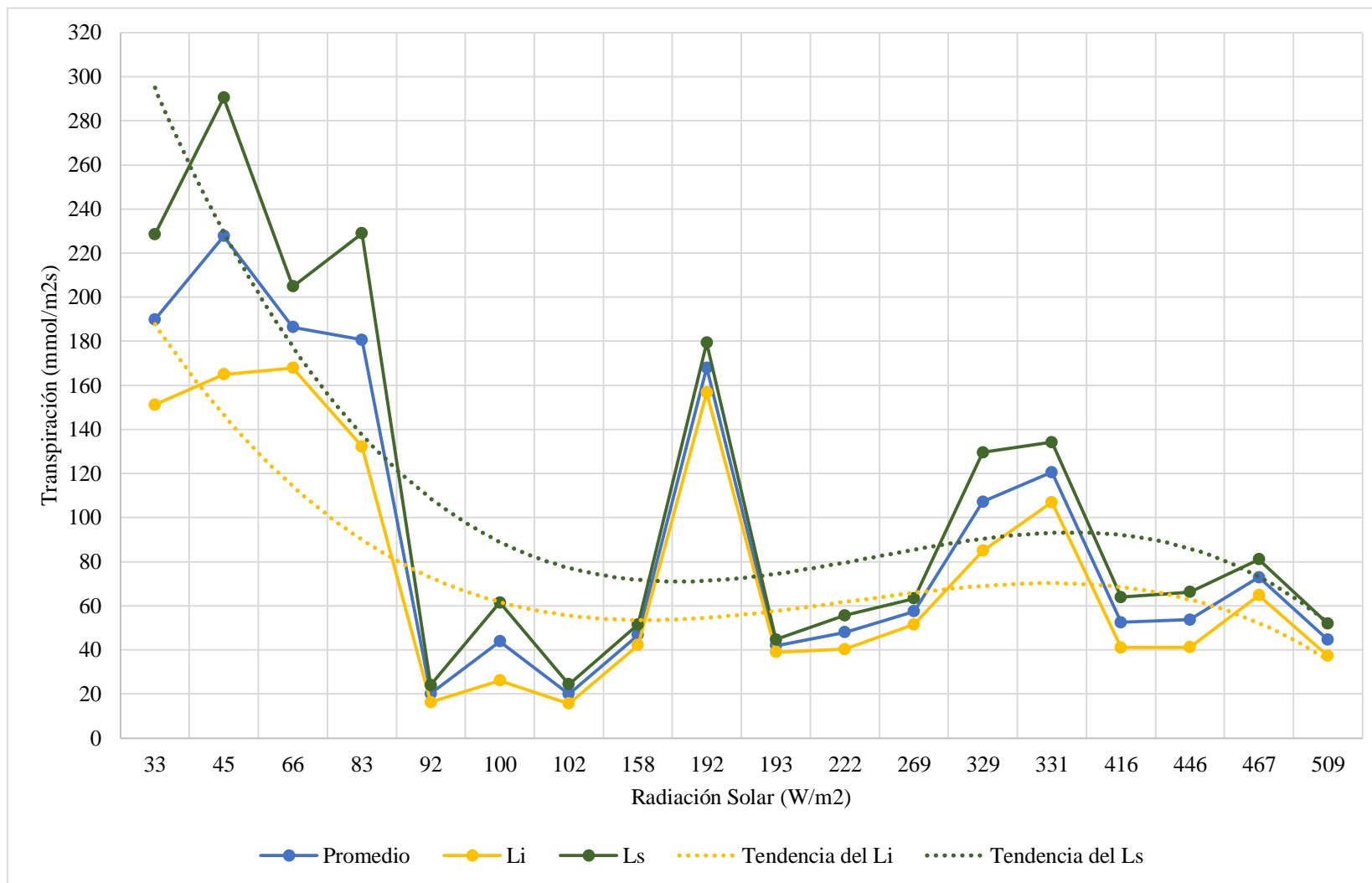


Figura 37. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas bajas (6am-8am)

5.4.2 Horario de medición: 9am a 11am

Por lo que se refiere a las correlaciones entre las variables explicativas que presentan una relación lineal entre moderada, débil o escasa se presentan en el Cuadro 52.

Como se ha venido mencionando, estas son las variables que se someten al análisis de regresión lineal múltiple.

Cuadro 52. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas bajas-9am-11am)

	HR planta	T planta	T invernadero
T planta	-0,655		
	0,000		
T invernadero	-0,078	0,469	
	0,368	0,000	
RS	-0,527	0,209	-0,079
	0,000	0,015	0,360

Prosiguiendo nuestro estudio, en el Cuadro 53 se observa la ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición.

La semejanza que presenta la ecuación de la transpiración de las hojas bajas con el modelo estadístico de la transpiración de las hojas altas (en este mismo horario de medición), es que en las dos alturas de hoja la variable explicativa RS presenta significancia en la ecuación de la variable respuesta. Además, la semejanza que presenta con la ecuación de la transpiración de las hojas medias (en el mismo horario) es que en ambas alturas de hoja la HR de la planta y la T de esta son variables significativas en el modelo estadístico. Y se diferencian porque en la ecuación de la transpiración de las hojas altas y medias aparece la influencia significativa de la HR del invernadero y en este caso se observa la significancia de la T del invernadero.

El coeficiente de determinación da un valor de 81,74%. Lo que quiere decir este coeficiente se clasifica como bueno, según el Cuadro 4. En la ecuación se puede ver como la T de la planta presenta el coeficiente más elevado.

Cuadro 53. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (9am-11am)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	-13240 + 110,2 HR planta + 382,4 T planta – 40,1 T invernadero + 12,46 RS - 0,05485 RS*HR planta – 0,3411 RS*T planta + 0,0592 RS*T invernadero – 2,292 HR planta*T planta
---------------------------------------	---	---

El siguiente punto trata sobre el comportamiento de cada variable explicativa significativa con la variable respuesta, cada comportamiento se puede observar en las siguientes figuras:

En la Figura 38 se muestra la gráfica del comportamiento de la HR de la planta y la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición. En este caso con forme aumenta la HR de la planta entre los porcentajes de 65% y 90% la variación de la transpiración es mayor.

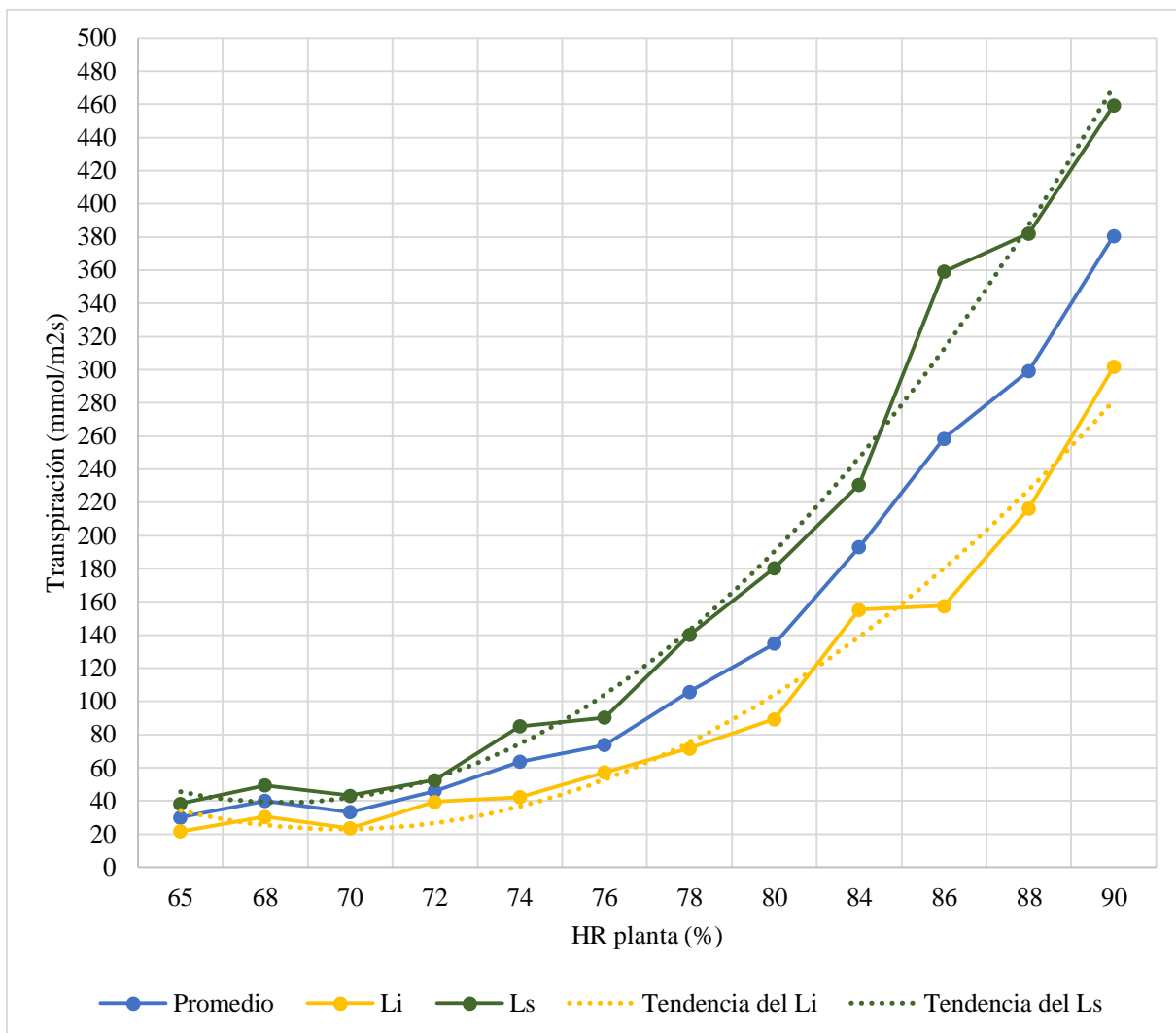


Figura 38. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (9am-11am)

En la Figura 39 se muestra la gráfica de comportamiento de la temperatura de la planta y la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición. En este caso la variabilidad de la transpiración disminuye con forme aumenta la temperatura de la planta.

Seguidamente, en la Figura 40 se observa el comportamiento de la temperatura del invernadero y la variable respuesta.

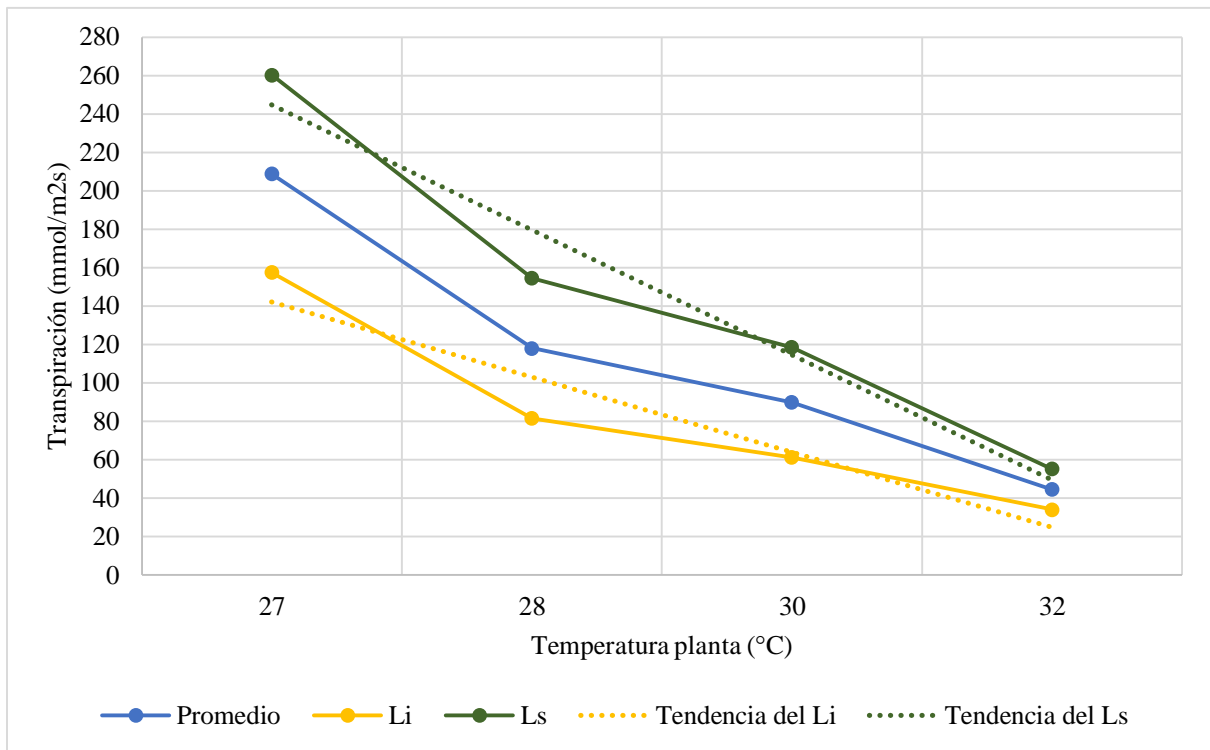


Figura 39. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (9am-11am)

La variabilidad de la transpiración aumenta entre las siguientes temperaturas del invernadero: De 21°C a 28°C y seguidamente después de esa temperatura hasta 29°C la variabilidad de la variable respuesta disminuye.

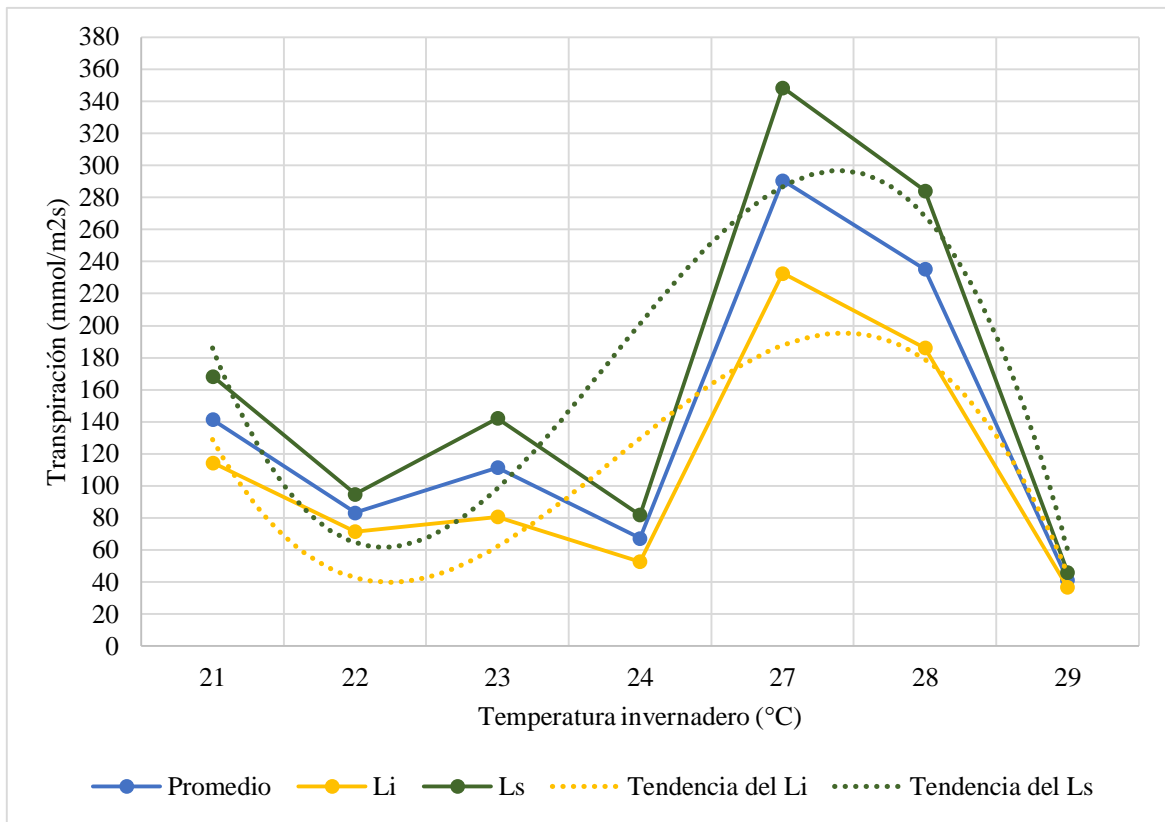


Figura 40. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas bajas (9am-11am)

Además, en la Figura 41 se observa el comportamiento de la radiación solar y la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición. La variabilidad de la transpiración es menor con forme aumenta la RS.

Seguidamente, se muestra en el Cuadro 54 cada intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración medida con el porómetro y la calculada con la ecuación del Cuadro 53. Se observa una diferencia de 1,94 mmol/m²s, por lo tanto, el modelo matemático propuesto es adecuado con una probabilidad del 88%.

Cuadro 54. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas bajas-9am-11am)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	136	124,71	115,47	(106,18; 143,24)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	136	126,65	103,73	(108,13; 145,18)

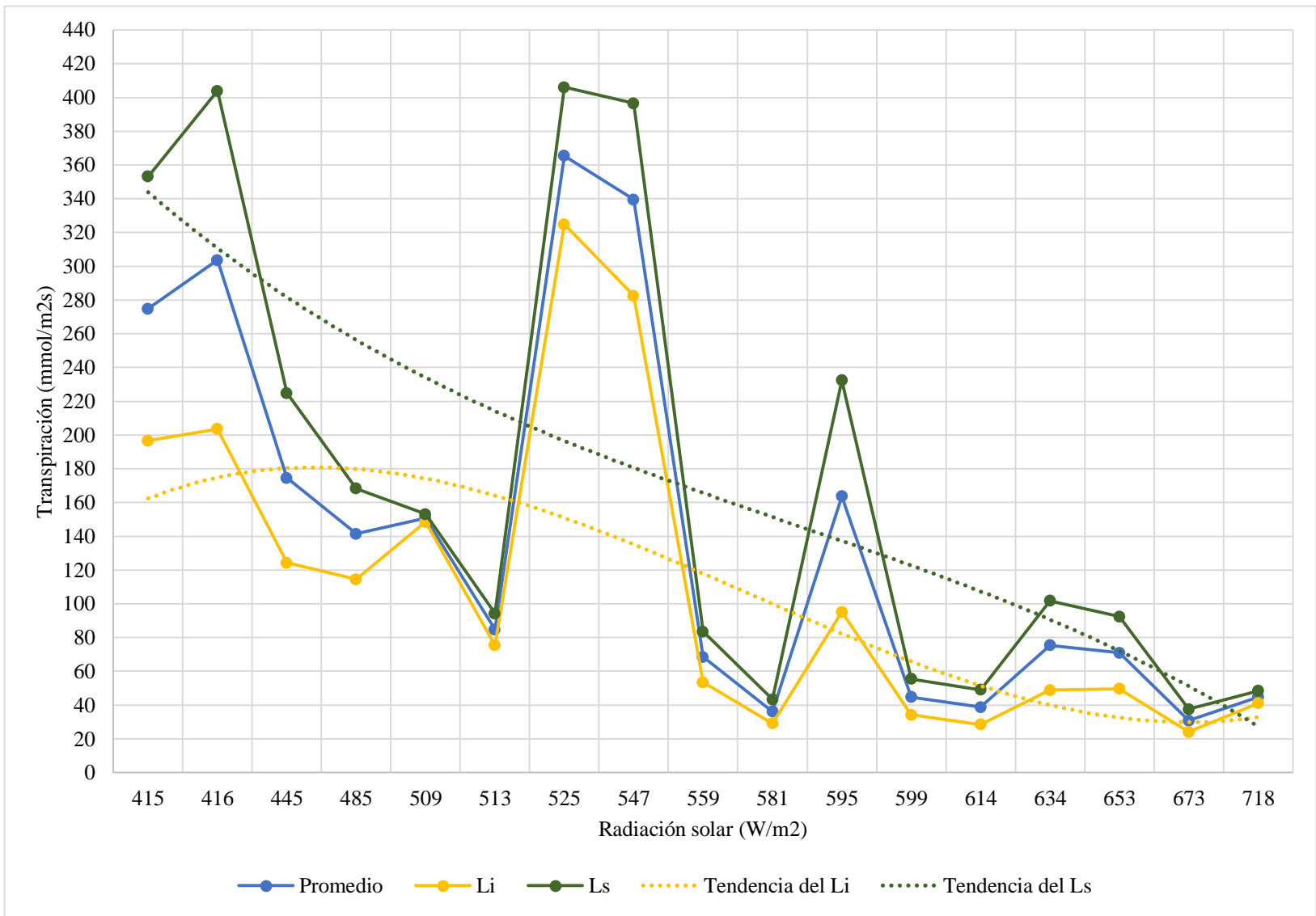


Figura 41. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas bajas (9am-11am)

5.4.3 Horario de medición: 1pm a 3pm

A continuación, en el Cuadro 55 se observan las variables que presentan correlaciones: moderadas, débiles o nulas con el fin de involucrarlas en el análisis de regresión múltiple y no se presenten problemas de multicolinealidad.

Cuadro 55. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas bajas-1pm-3pm)

	HR planta	T planta	T invernadero	HR invernadero
T planta	-0,575			
	0,000			
T invernadero	-0,118	0,398		
	0,174	0,000		
HR invernadero	0,676	-0,639	-0,414	
	0,000	0,000	0,000	
RS	-0,116	0,029	-0,598	-0,054
	0,181	0,735	0,000	0,536

Por otra parte, la ecuación de regresión múltiple para la variable respuesta se muestra en el Cuadro 56. Se observa como la variable explicativa significancia más influyente en la transpiración de las hojas bajas en este horario es la HR del invernadero.

En la ecuación de la transpiración de las hojas altas y medias en este mismo horario, la RS presenta significancia con la variable respuesta, por lo tanto, esta es la diferencia que se presenta con la ecuación de la transpiración en una altura baja de hoja (esto se vio anteriormente en el Cuadro 32, para las hojas altas y en el Cuadro 44, para las hojas medias).

Este modelo estadístico presenta un coeficiente de determinación de 83,40%, un coeficiente bueno si se compara con el Cuadro 4.

Cuadro 56. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (1pm-3pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	1444 + 8,63 T planta – 8,02 T invernadero – 33,91 HR invernadero – 18,53 HR planta + 0,4499 HR invernadero*HR planta
---------------------------------------	---	--

Seguidamente, se puede observar el comportamiento de cada variable explicativa significativa con la variable respuesta en las siguientes figuras:

En la Figura 42 se muestra la gráfica del comportamiento de la humedad relativa de la planta y la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición.

La variabilidad de la transpiración es mayor con forme aumenta el porcentaje de la HR de la planta.

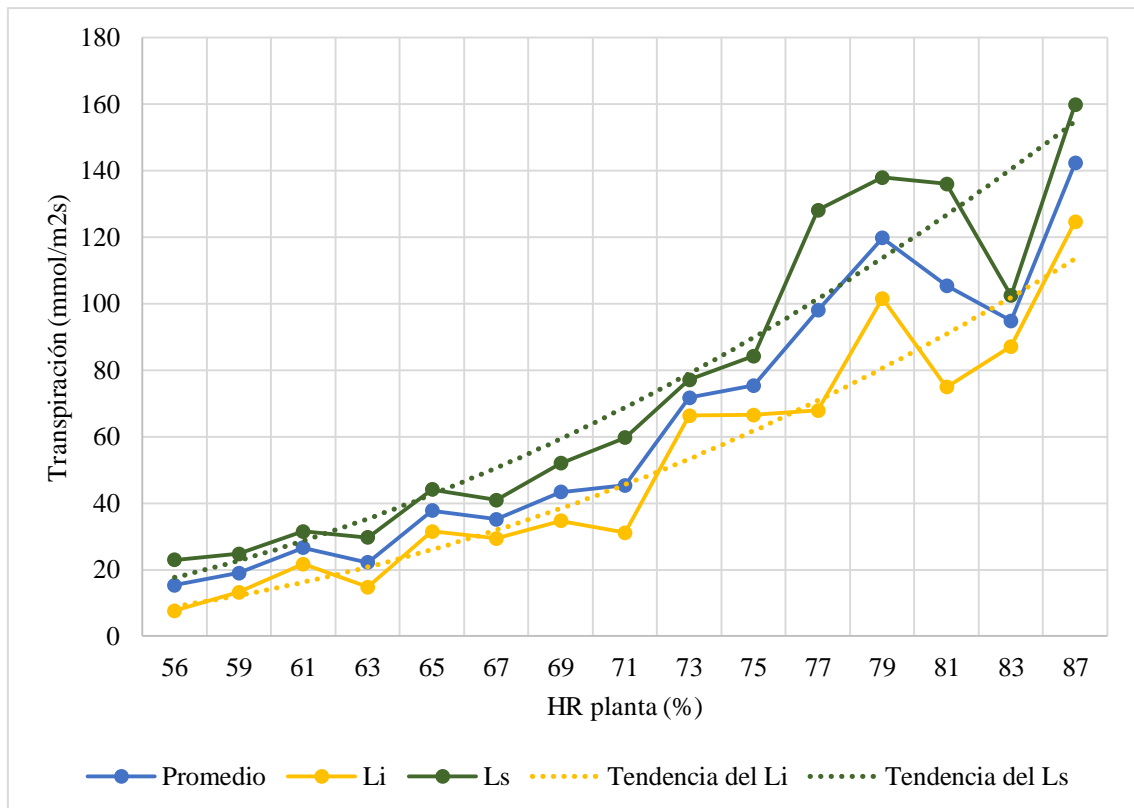


Figura 42. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (1pm-3pm)

En la Figura 43 se observa la gráfica de la T de la planta y la variable respuesta. La variabilidad de la transpiración es mayor cuando la T de la planta está entre 25°C a 27°C y entre 31°C a 34°C.

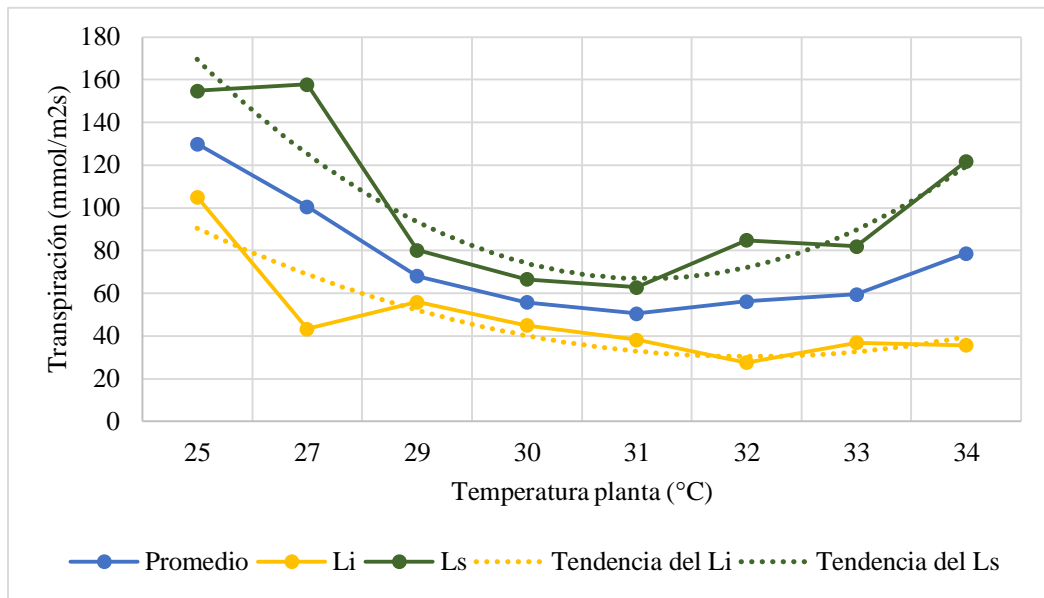


Figura 43. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (1pm-3pm)

En la Figura 44 se puede ver el comportamiento de la temperatura del invernadero y la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición. Se observa como la variabilidad de la transpiración disminuye con forme aumenta la temperatura del invernadero.

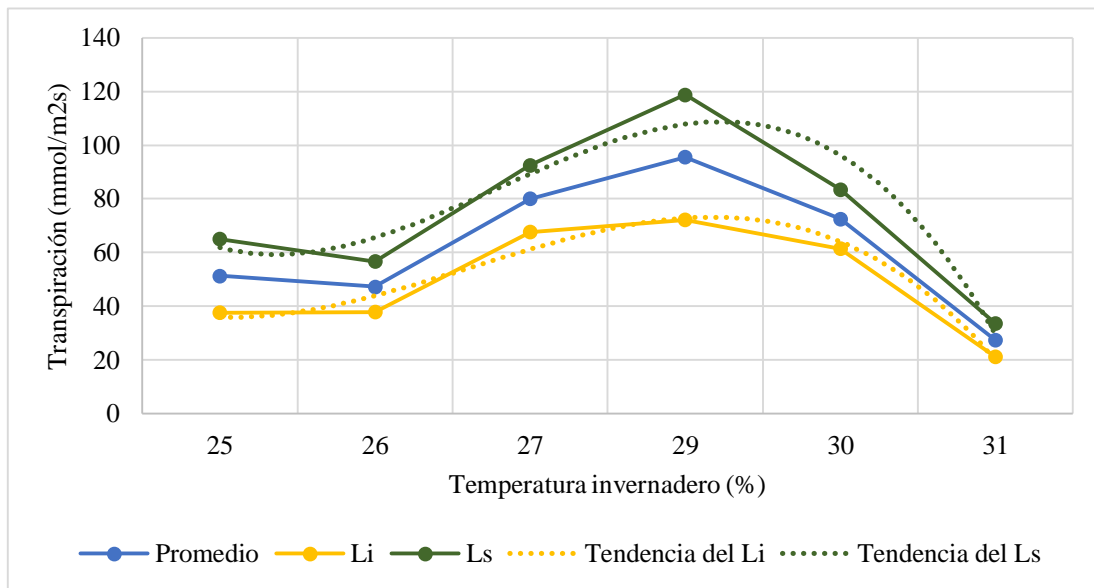


Figura 44. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas bajas (1pm-3pm)

Por último, en la Figura 45 se observa la gráfica de la humedad relativa del invernadero y la variable respuesta. La variación de la transpiración aumenta con forme aumenta la HR del invernadero.

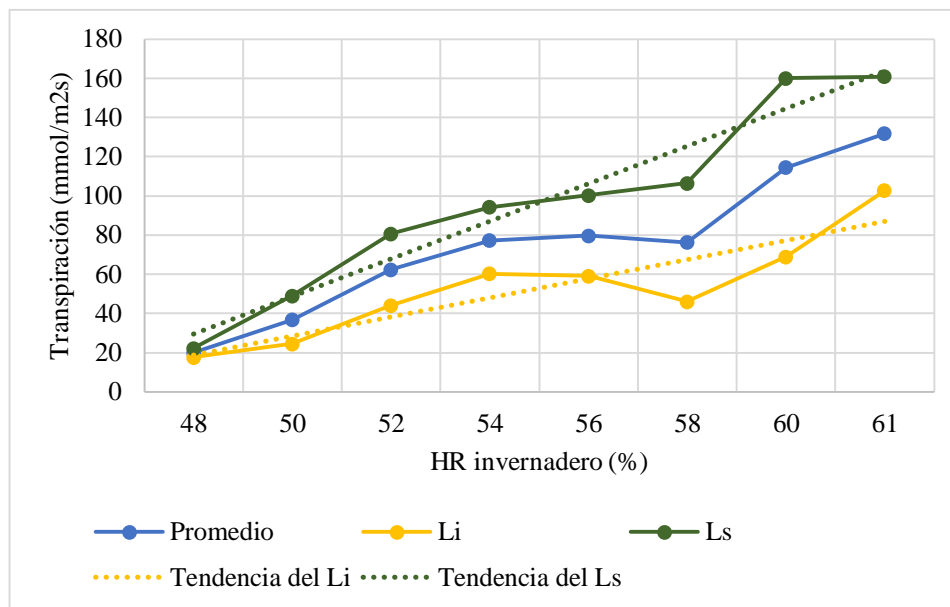


Figura 45. Gráfica de la humedad relativa del invernadero versus la transpiración de las hojas bajas (1pm-3pm)

Seguidamente, en el Cuadro 57 se observa una diferencia entre las medias de las transpiraciones en estudio de 0,33 mmol/m²s. Por lo que se comprueba que las medias son muy iguales y el modelo estadístico es adecuado con una probabilidad del 95%.

Cuadro 57. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y calculada (hojas bajas-1pm-3pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	135	66,70	41,07	(60,04; 73,37)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	135	67,03	37,50	(60,37; 73,70)

5.4.4 Horario de medición: 3pm a 5pm

En el Cuadro 58 se muestran los coeficientes de Pearson entre los predictores que presenten una relación lineal débil. Para poder involucrarlas en el análisis de regresión múltiple.

Cuadro 58. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas bajas-3pm-5pm)

	HR planta	T invernadero
T invernadero	-0,118	
	0,159	
RS	-0,385	0,491
	0,000	0,000

Prosiguiendo nuestro análisis, en el Cuadro 59 se observa el modelo estadístico para la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición. La variable más influyente es la T del invernadero

En la ecuación de la transpiración de las hojas altas y medias, en este mismo horario de medición, la variable explicativa RS presenta significancia con la variable respuesta de igual manera que la transpiración de las hojas bajas.

Mencionar, además, que la transpiración de las hojas bajas se diferencia de la transpiración de las hojas altas y medias, en este mismo horario de medición, debido a que, en la ecuación de la transpiración de las hojas bajas, la T del invernadero es una de las variables explicativas significativas de la variable respuesta un modelo estadístico de regresión lineal múltiple.

Se obtiene un coeficiente de determinación igual a 68,75%. Si se compara este valor con el Cuadro 4, se dice que tenemos un coeficiente de determinación bueno.

Cuadro 59. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (3pm-5pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	-2907 + 33,57 HR planta + 96,2 T invernadero + 1,776 RS - 0,0555 RS*T invernadero - 1,089 T invernadero*HR planta
---------------------------------------	---	--

El siguiente aspecto trata sobre el comportamiento que presenta cada predictor significativo con la variable respuesta.

En la Figura 46 se muestra la gráfica de la humedad relativa de la planta y la variable respuesta. Se puede ver como con forme aumenta el porcentaje de HR de la planta la variabilidad de la transpiración es mayor.

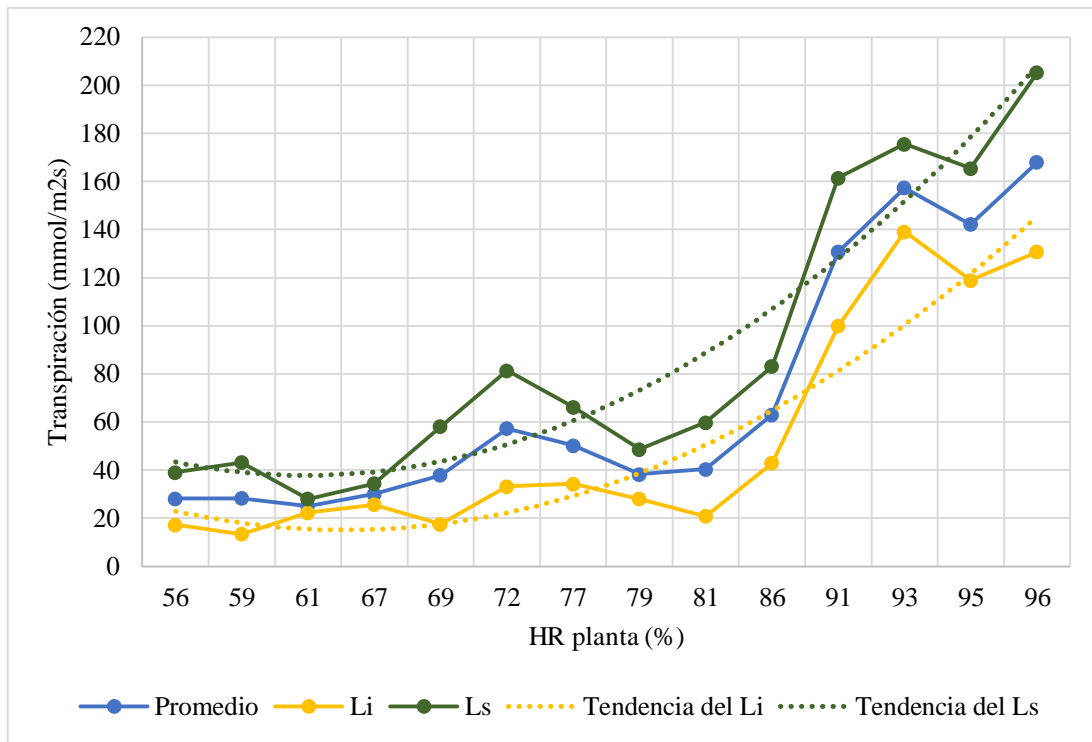


Figura 46. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (3pm-5pm)

Además, en la Figura 47 se puede ver la gráfica del comportamiento de la temperatura del invernadero y la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición. En este caso la variación de la variable respuesta es mayor con forme aumenta la T del invernadero.

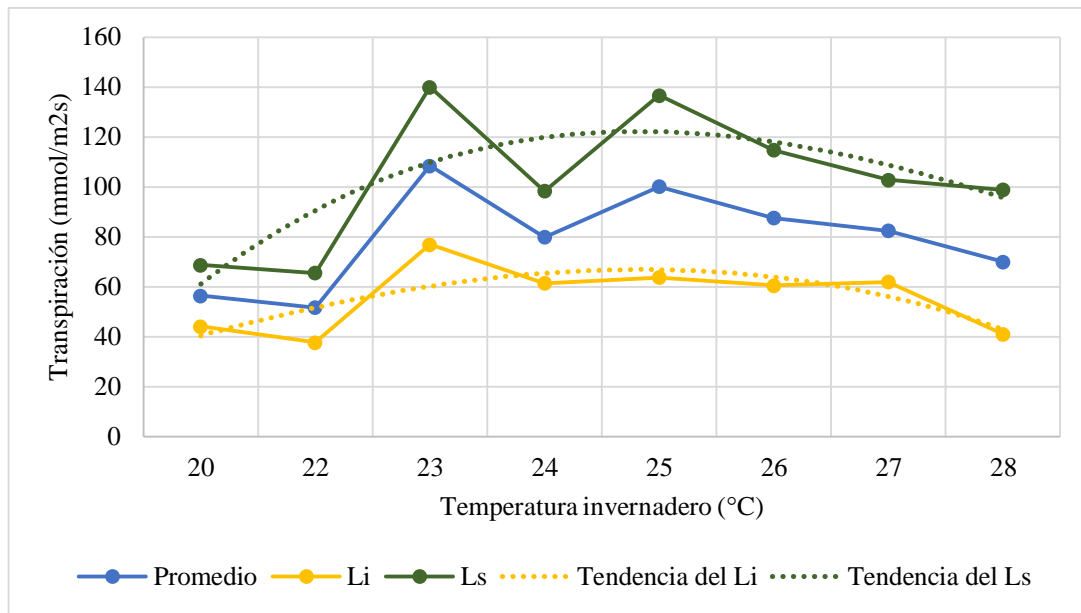


Figura 47. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas bajas (3pm-5pm)

Además, en la Figura 48 se muestra la gráfica del comportamiento de la radiación solar y la variable respuesta. La variabilidad de la transpiración aumenta con forme aumenta la RS.

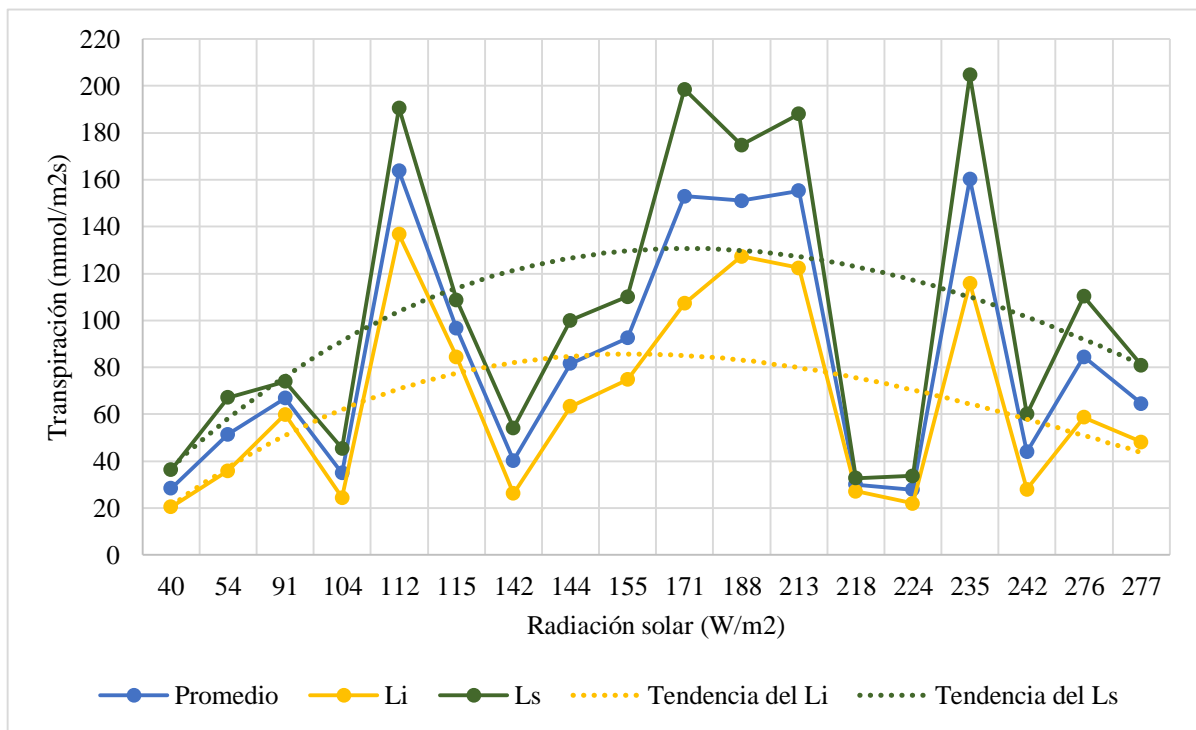


Figura 48. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas bajas (3pm-5pm)

Seguidamente, en el Cuadro 60 se muestra una diferencia de 0,61 mmol/m²s entre la media de la transpiración medida con el instrumento y la transpiración calculada. Por lo que se concluye que el modelo es adecuado con una probabilidad del 92%.

Cuadro 60. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y calculada (hojas bajas-3pm-5pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	144	79,96	55,03	(71,67; 88,26)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	144	80,57	45,70	(72,27; 88,86)

Anteriormente, se analizaron los datos en dos horarios de la mañana y dos horarios en la tarde. Por lo tanto, el siguiente aspecto trata sobre análisis de regresión múltiple para las hojas altas, medias y bajas en un horario de la mañana (6 am-12 pm) y otro de la tarde (12 pm-6 pm).

Se siguió la misma metodología de las mediciones anteriores y las pruebas mostraron los mismos resultados:

En ciertos horarios, la única variable que mostró valores extraños en su conjunto de datos fue la transpiración (valores desechados del análisis). Igualmente, que, en los casos anteriores, se va a mostrar la matriz de correlaciones de las variables que después del previo estudio dieron una relación lineal entre moderada, débil o escasa.

Mencionar, además, que se analizan estas variables explicativas al cubo debido a que como se estudia el comportamiento de la variable respuesta entre las primeras 6 horas del día, se quiere saber si hay cierto comportamiento cúbico.

Las gráficas mostradas en cada horario, como en los casos anteriores, corresponden solamente a el comportamiento de cada predictor significativo en el modelo estadístico propuesto con la variable respuesta. En cada gráfica se puede observar una variabilidad en la transpiración, es decir, un rango de acción en donde se puede encontrar el valor verdadero de la variable respuesta en un valor determinado de la variable explicativa. Esta variación se debe a que no solamente influye el predictor gráfico con la transpiración, sino también, las demás variables significativas en el modelo. Lo que significa que los predictores significativos actúan simultáneamente en la transpiración de las hojas.

La prueba de ANOVA de un solo factor para la transpiración experimental y calculada para todos los horarios y altura de hoja dieron como resultado un valor p mayor que el nivel de significancia por lo que se acepta la hipótesis nula y las medias son iguales. Por lo que las transpiraciones son iguales y cada modelo estadístico se ajusta a la realidad. Para cada horario y altura de hoja se va a mostrar el intervalo de confianza del 95% para comprobar la información anterior y la probabilidad del modelo matemático propuesto.

5.5 Hojas Altas

5.5.1 Horario de medición: 6am a 12pm

A continuación, en el Cuadro 58 se observa el coeficiente de Pearson entre la RS y la HR de la planta. Se puede ver que el coeficiente presenta una relación lineal entre moderada y fuerte en sentido positivo.

Cuadro 61. Correlaciones entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas altas-6am-12pm)

Correlación de Pearson	-0,592
Valor p	0,000

En el Cuadro 62 se puede ver la ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas en este horario de medición. La HR de la planta y la RS influye de forma cúbica con la transpiración de las hojas altas en este horario de medición.

El coeficiente de determinación de este modelo estadístico presenta un valor de 37,54%, por lo que se dice que los predictores significativos explican el 37,54% de la variable respuesta. Además, comparando este valor con el Cuadro 4, se dice que tenemos un coeficiente regular. La HR de la planta es la variable que presenta el coeficiente más elevado.

Cuadro 62. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (6am-12pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	-1456 + 26,23 HR planta + 0,3680 RS – 0,0000004 RS ³ – 0,001170 (HR planta) ³
---------------------------------------	---	---

Seguidamente, se muestran las gráficas que permiten ver y comprender de una mejor manera el comportamiento de las variables explicativas significativas con la transpiración de las hojas altas en este horario de medición.

En primer lugar, se observa la Figura 49 que muestra el comportamiento de la humedad relativa de la planta y la transpiración de las hojas bajas en el horario de la mañana.

En este caso la variabilidad de la transpiración aumenta con forme aumenta el porcentaje de humedad relativa de la planta.

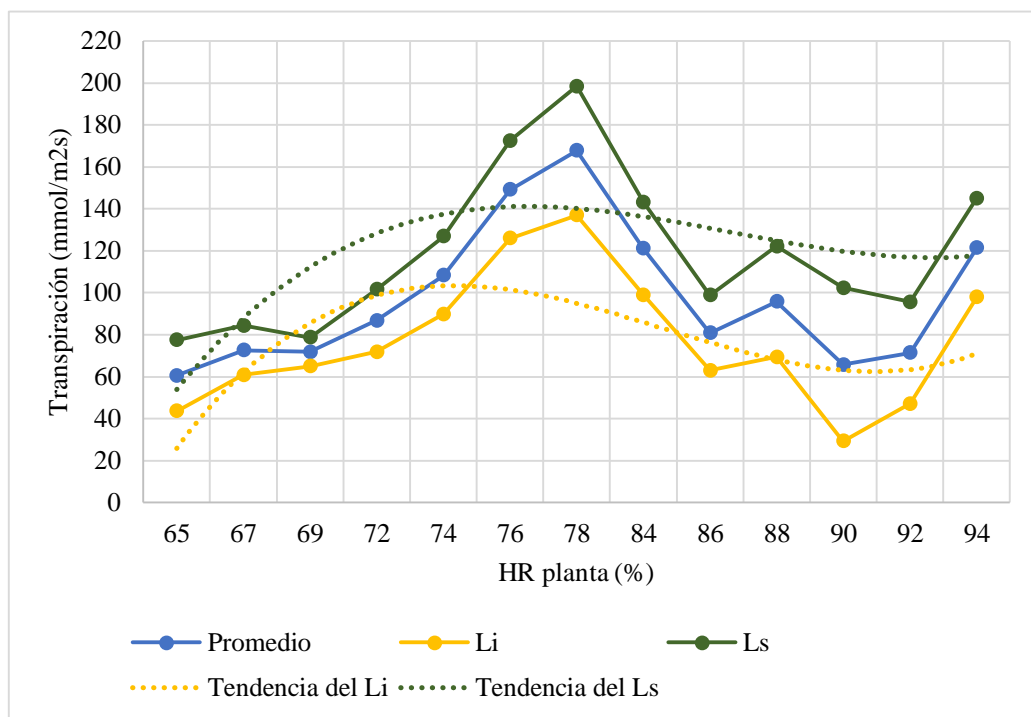


Figura 49. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas altas (6am-12pm)

En última instancia, se observa la Figura 50 que presenta el comportamiento de la radiación solar y la transpiración de las hojas altas en el horario de la mañana. Con forme aumenta la RS la variabilidad de la transpiración es mayor.

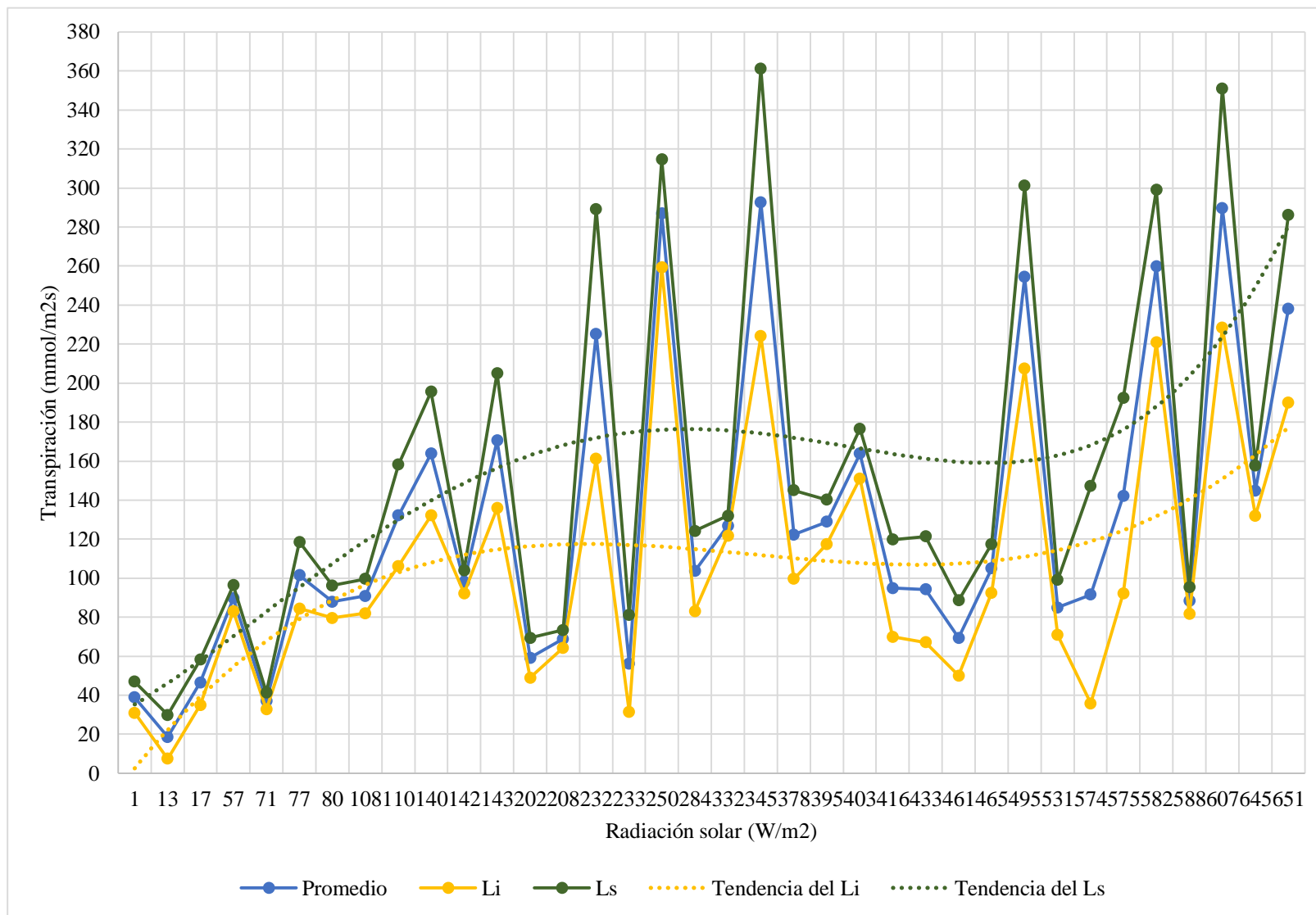


Figura 50. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (6am-12pm)

Seguidamente, en el Cuadro 63 se puede ver el intervalo de confianza del 95% para cada transpiración en estudio. Se observa una diferencia de 0,83 mmol/m²s, por lo tanto, el modelo es adecuado y presenta una probabilidad del 86%.

Cuadro 63. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas altas-6am-12pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	370	118,42	77,21	(111,86; 124,99)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	370	119,25	48,09	(112,69; 125,82)

5.5.2 Horario de medición: 12pm a 6pm

Seguidamente, en el Cuadro 64 se observan las correlaciones lineales moderadas y escasas entre las variables explicativas que las presenten. Por consiguiente, la T de la planta, la RS y la HR de la planta son las variables que se someten al análisis de regresión múltiple.

Cuadro 64. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas altas-12pm-6pm)

	HR planta	T planta
T planta	-0,683	
	0,000	
RS	0,187	0,191
	0,000	0,000

En el Cuadro 65 se observa la ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas en el horario de la tarde. En este caso la HR de la planta es la única variable que influye de forma significativa elevada al cubo.

La ecuación de transpiración de las hojas altas de la mañana se diferencia de la ecuación de la transpiración de las hojas altas en un horario de la tarde, porque en esta última, presenta significancia con la variable respuesta la T de la planta.

Además, en la ecuación se observa como la T de la planta presenta el coeficiente más elevado, por consiguiente, es la variable que tiene más influencia. Este modelo estadístico presenta un valor de 92,75% para el coeficiente de determinación.

Cuadro 65. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas altas (12pm-6pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	= 5067 – 82,92 HR planta – 120,1 T planta + 0,01062 RS + 0,002867 (HR planta) ³
---------------------------------------	--

Seguidamente, se muestran las gráficas que representan el comportamiento de cada variable explicativa significativa con la variable respuesta.

En la Figura 51 se puede ver la gráfica de la humedad relativa de la planta y la transpiración de las hojas altas en el horario de la tarde. Con forme aumenta el porcentaje de la HR de la planta la variabilidad de la transpiración es mayor, esta variable presenta significancia al cubo.

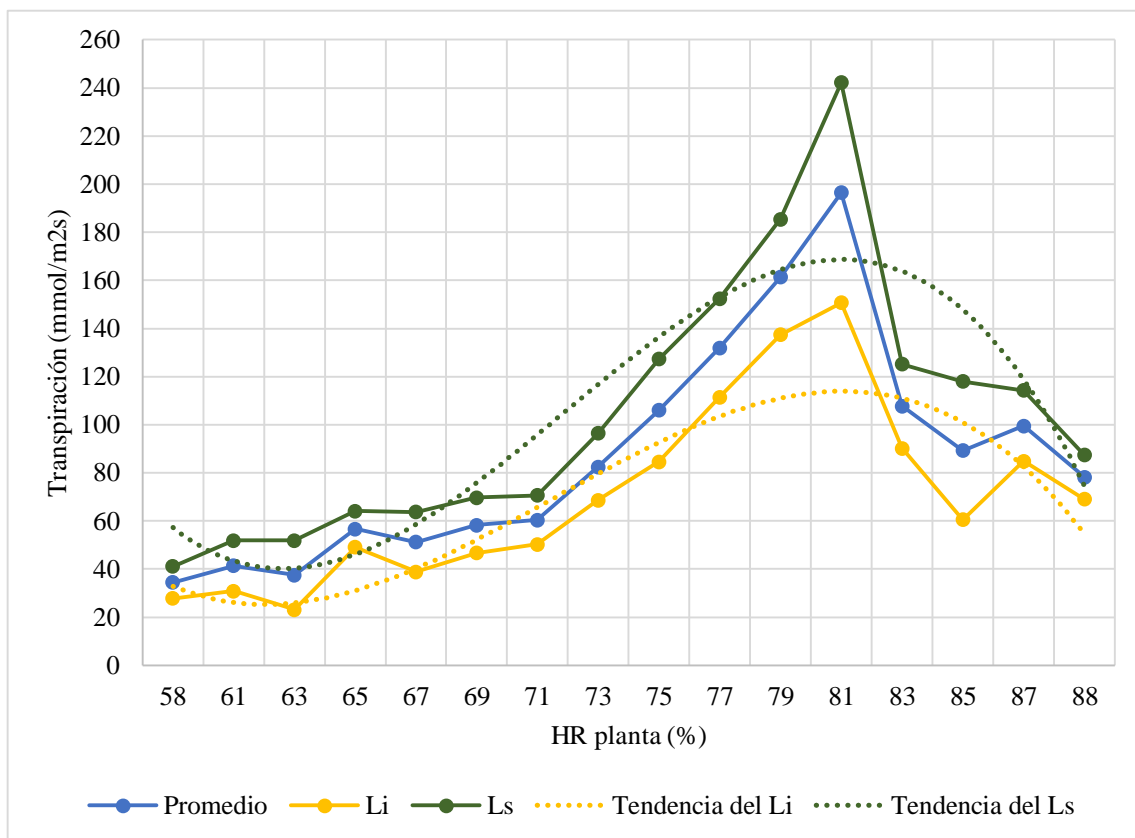


Figura 51. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas altas (12pm-6pm)

En la Figura 52 se puede ver la gráfica del comportamiento de la temperatura de la planta y la transpiración de las hojas altas en el horario de la tarde. La variabilidad de la transpiración es mayor con forme aumenta la temperatura de la planta.

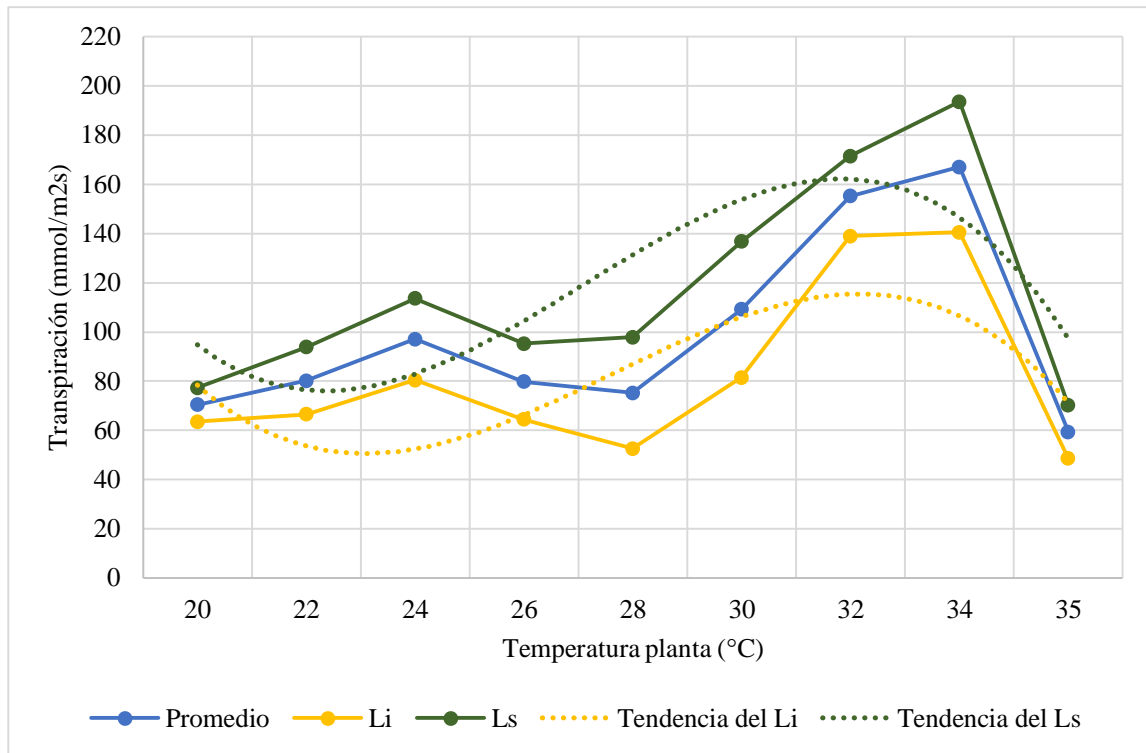


Figura 52. Gráfica de la temperatura de la planta versus la transpiración de las hojas altas (12pm-6pm)

A continuación, en la Figura 53 se puede ver la gráfica del comportamiento de la radiación solar y la transpiración de las hojas altas en el horario de la tarde. En este caso, la variabilidad de la transpiración es mayor con forme aumenta la RS. Este comportamiento es igual al que se presenta en la variabilidad de la transpiración de las hojas altas en el horario de la mañana.

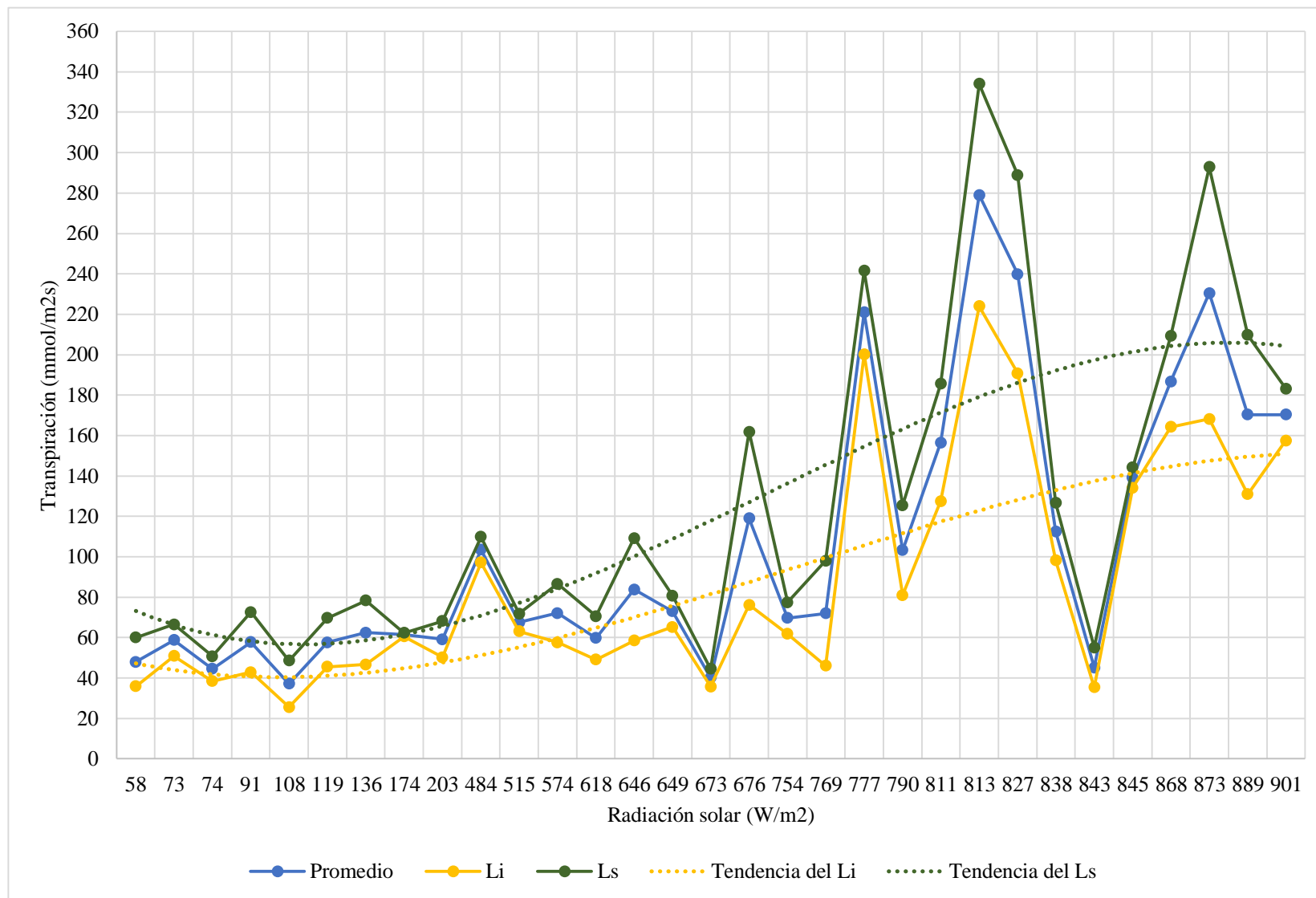


Figura 53. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas altas (12pm-6pm)

Seguidamente, en el Cuadro 66 se confirma que el modelo es adecuado con una probabilidad del 95% ya que se presenta una diferencia de medias de 0,3 mmol/m²s entre la transpiración medida y la calculada con la ecuación del modelo estadístico.

Cuadro 66. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas altas-12pm-6pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	369	113,00	67,71	(106,20; 119,79)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	369	112,70	65,22	(105,90; 119,49)

5.6 Hojas Medias

5.6.1 Horario de medición: 6am a 12pm

En el Cuadro 67 se muestra el coeficiente de Pearson entre la HR de la planta y la RS. Se observa una relación lineal moderada según el Cuadro 1. Por lo tanto, estas son las variables que se someten al análisis de regresión múltiple.

Cuadro 67. Correlaciones entre las variables explicativas con su valor de probabilidad (hojas medias-6am-12pm)

Correlación de Pearson	-0,631
Valor p	0,000

Avanzando en nuestro razonamiento, en el Cuadro 68 se observa la ecuación de regresión múltiple para la variable respuesta en las hojas medias de 6 am a 12 pm. Todas las variables sometidas al análisis de regresión múltiple muestran significancia con la variable respuesta.

La diferencia que muestra con la ecuación de la transpiración de las hojas altas (Cuadro 62) en este mismo horario de medición, es que en la ecuación de la transpiración de las hojas medias las variables explicativas que presentan significancia son la HR de la planta, la RS, estas variables en su forma cúbica y la interacción entre ellas. (Como se observó en el Cuadro 68)

La HR de la planta presenta el coeficiente más elevado y por lo tanto es la variable que más influye en la transpiración de las hojas medias de la mañana. Por otro lado, el coeficiente de determinación dio un valor igual a 57,28%. Un coeficiente de determinación bueno.

Cuadro 68. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (6am-12pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	$1187 - 20,19 \text{ HR planta} - 1,343 \text{ RS} + 0,000924 (\text{HR planta})^3$ $+ 0,0000001 \text{ RS}^3$ $+ 0,01835 \text{ RS*HR planta}$
---------------------------------------	---	---

Prosiguiendo nuestro análisis, se muestran a continuación gráficas que nos ayudarán a comprender de una mejor manera el comportamiento de las variables explicativas con la variable respuesta.

En primer lugar, se muestra la gráfica del comportamiento de la humedad relativa de la planta y la transpiración de las hojas medias en el horario de la mañana. (Ver Figura 54)

Se observa como con forme aumenta la HR de la planta la variabilidad de la transpiración es mayor, por lo que se presenta el mismo comportamiento de la variación de la transpiración de las hojas altas con respecto a esta variable (en el mismo horario de medición). La HR de la planta influye de manera cúbica con la transpiración de las hojas medias y también interactuando con la RS.

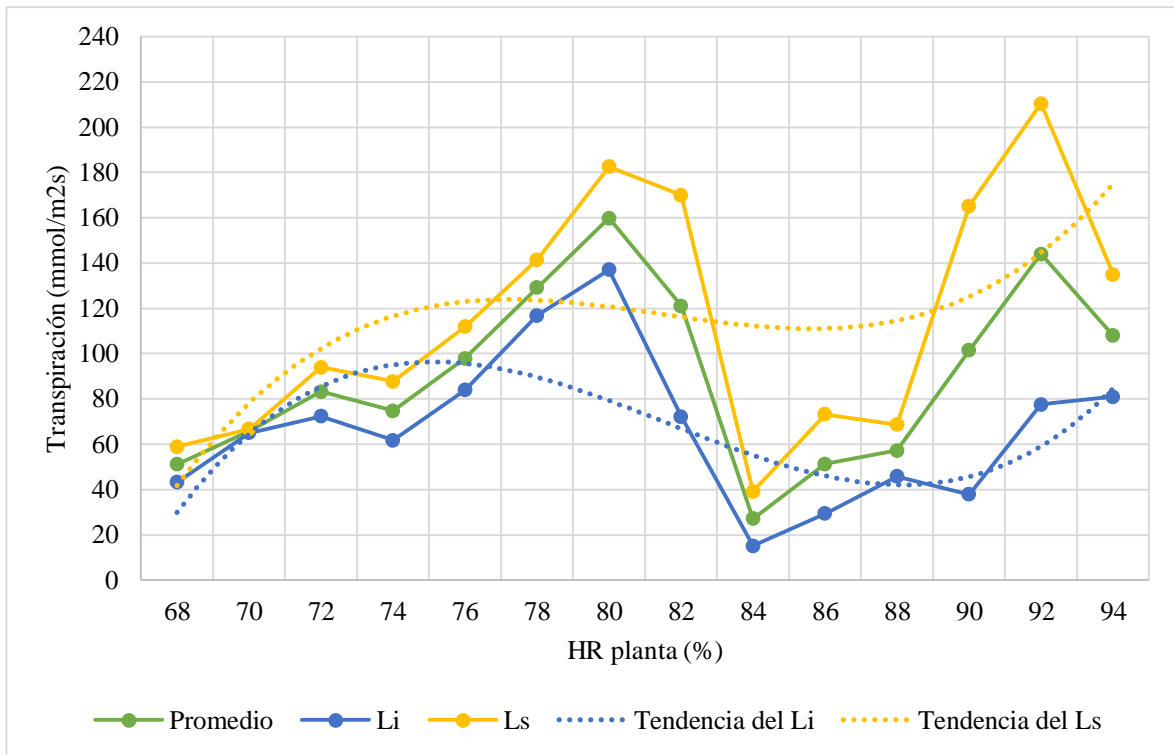


Figura 54. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (6am-12pm)

En segundo lugar, en la Figura 55 se puede ver el comportamiento de la RS y la transpiración de las hojas medias en el horario de la mañana. La mayor variación de la transpiración se da cuando aumenta la RS.

Finalmente, en el Cuadro 69 se observa el intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la teórica. Se puede ver una diferencia de medias de 5,14 $\text{mmol/m}^2\text{s}$, es decir, el modelo se ajusta y es adecuado ya que las transpiraciones son iguales. El modelo presenta una probabilidad del 23%.

Cuadro 69. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas medias-6am-12pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental ($\text{mmol/m}^2\text{s}$)	370	101,51	63,83	(95,51; 107,50)
Transpiración calculada ($\text{mmol/m}^2\text{s}$)	370	106,65	53,10	(100,66; 112,64)

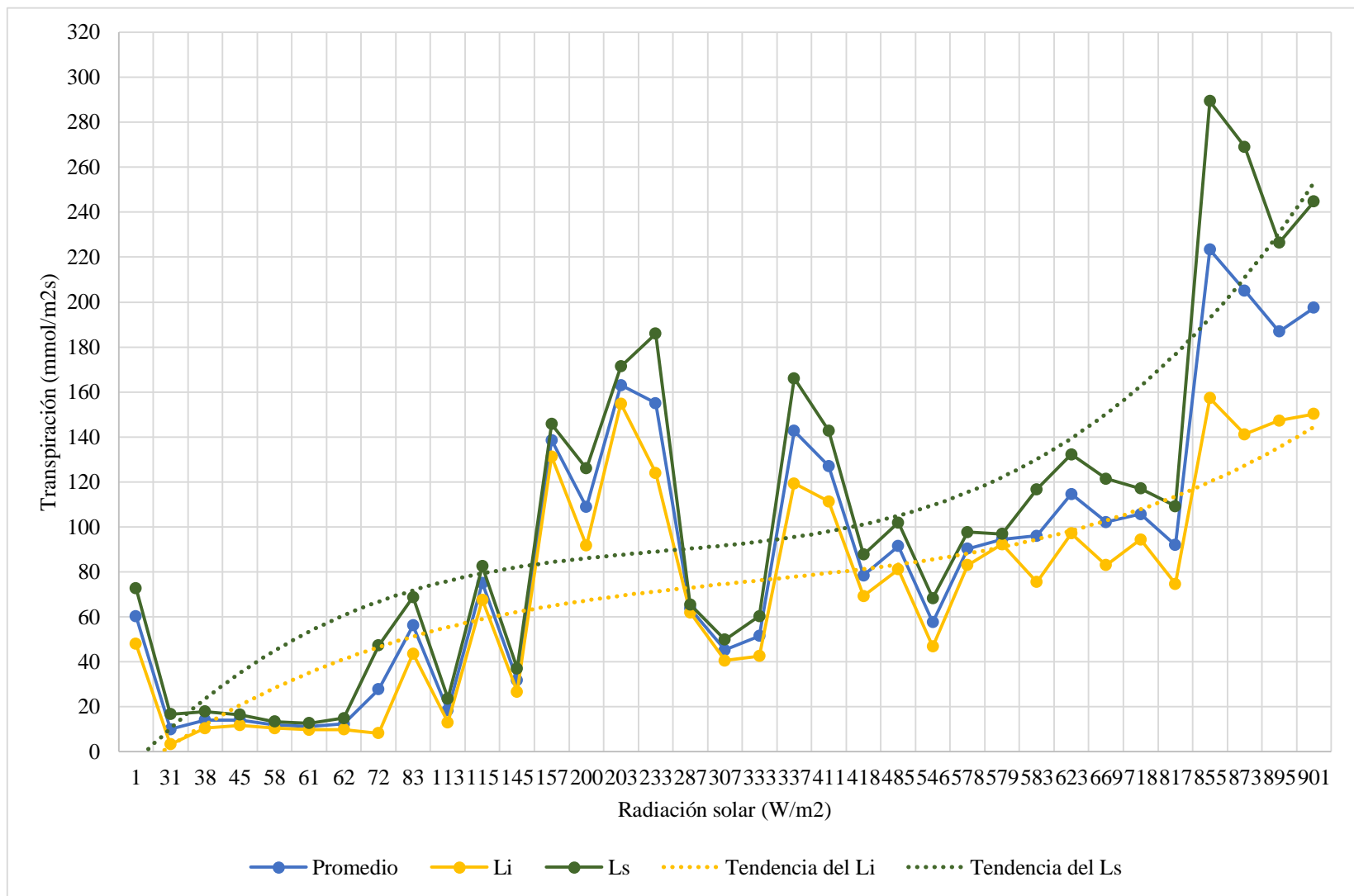


Figura 55. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas medias (6am-12pm)

5.6.2 Horario de medición: 12pm a 6pm

Consideremos ahora, el Cuadro 70 que muestra las variables explicativas que presentan una relación lineal moderada o débil entre ellas. Esto con el fin de evitar problemas de multicolinealidad.

Cuadro 70. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas medias-12pm-6pm)

	HR planta	HR invernadero
HR invernadero	0,579	
	0,000	
RS	-0,417	-0,649
	0,000	0,000

En el Cuadro 71 se muestra la ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias en el horario de la tarde.

La ecuación de regresión lineal múltiple de la transpiración de las hojas altas en la tarde se diferencia de la ecuación de la transpiración de las hojas medias en este mismo horario, debido a que en estas últimas presenta significancia la HR del invernadero y en las hojas altas no. Las variables significativas: HR planta y RS si son semejantes en ambos horarios de medición.

El coeficiente de determinación da un valor de 65,37%, un coeficiente bueno (según el Cuadro 4). La HR del invernadero presenta el coeficiente más elevado en la ecuación, por lo tanto, es la variable que más influye.

Cuadro 71. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas medias (12pm-6pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	-1539 + 12,59 HR planta + 49,81 HR invernadero – 0,1019 RS + 0,002463 (HR planta) ³ + 0,0000001 RS ³ – 0,7365 HR invernadero*HR planta
---------------------------------------	---	--

Examinaremos brevemente ahora, el comportamiento de cada variable explicativa significativa en el modelo estadístico con la transpiración de las hojas medias en este horario de medición de la tarde.

En la Figura 56 se muestra el comportamiento de la humedad relativa de la planta y la transpiración de las hojas medias. Con forme aumenta el porcentaje de HR de la planta la variabilidad de la transpiración es mayor. Esta variable es significativa al cubo e interactuando con la HR del invernadero.

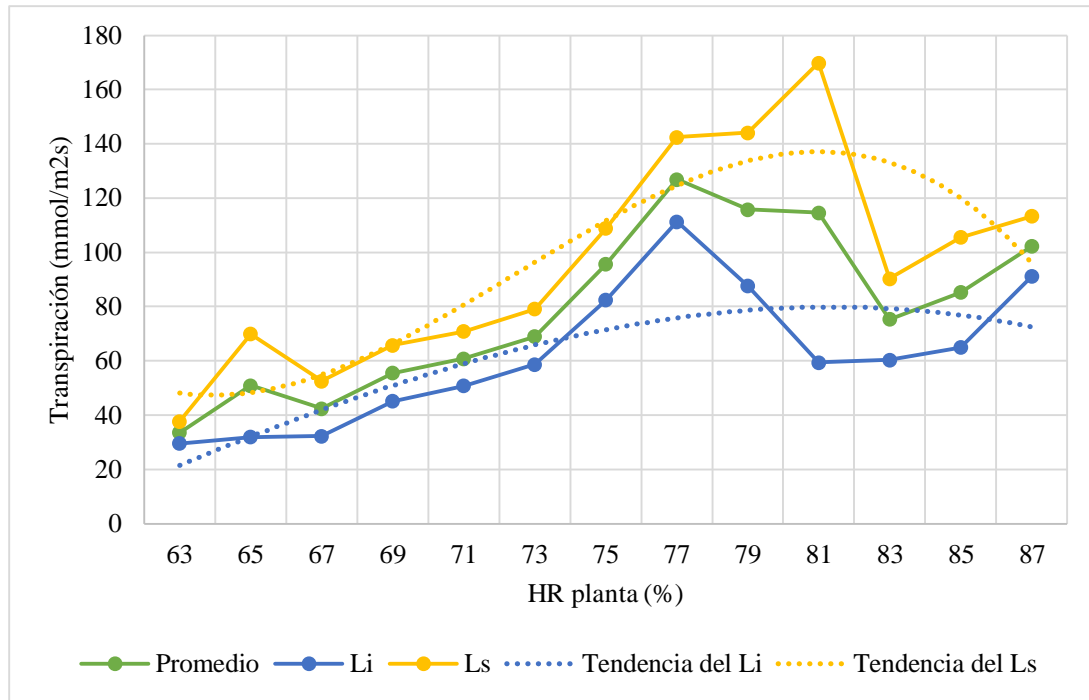


Figura 56. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas medias (12pm-6pm)

A continuación, en la Figura 57 se observa la gráfica de la humedad relativa del invernadero y la transpiración de las hojas medias en este horario de medición. Esta variable presenta significancia al cubo e interactuando con la HR de la planta.

La variabilidad de la transpiración es mayor con forme aumenta la humedad relativa del invernadero, con excepción de una HR del invernadero desde 72% a 76% (la variabilidad disminuye).

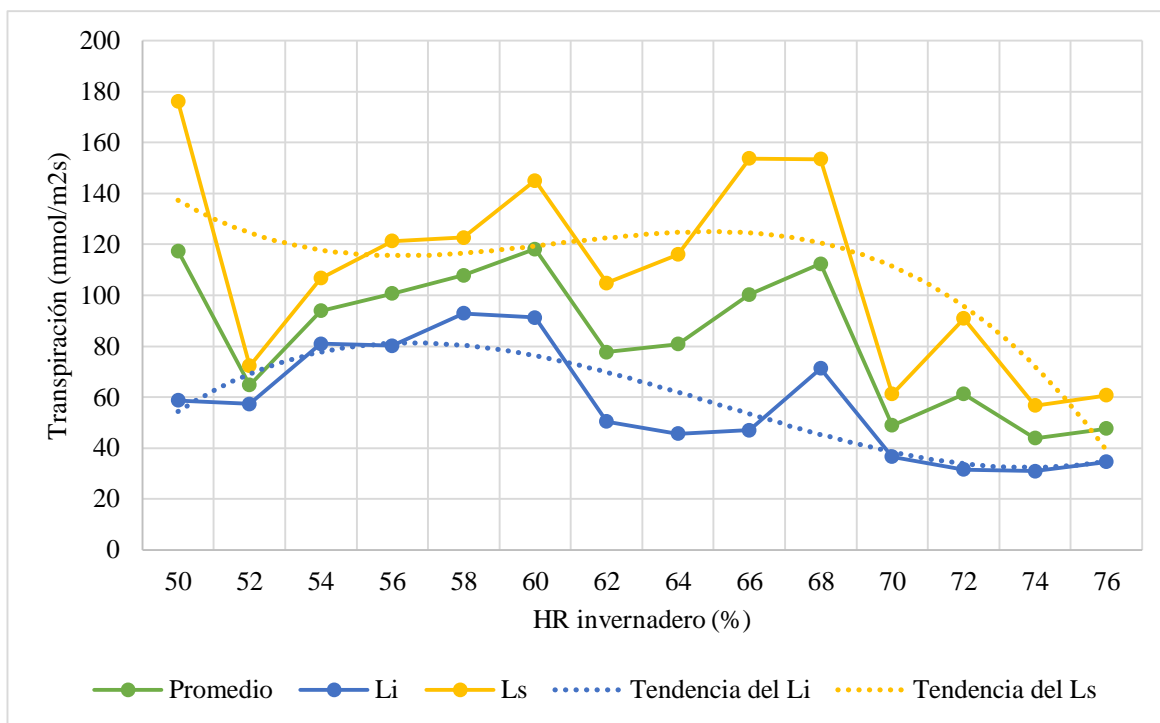


Figura 57. Gráfica de la humedad relativa del invernadero versus la transpiración de las hojas medias (12pm-6pm)

En la Figura 58 se puede ver el comportamiento de la RS y la variable respuesta. Esta variable presenta significancia con la variable respuesta en su forma cúbica. La mayor variación de la transpiración se da conforme aumenta la RS.

Dicho lo anterior, en el Cuadro 72 se observa que el modelo es adecuado con una probabilidad del 47%, ya que la transpiración medida con el porómetro y la calculada con la ecuación del Cuadro 71 muestran una diferencia de 2,45 mmol/m²s. Por lo que las medias son muy similares.

Cuadro 72. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas medias-12pm-6pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	367	86,35	51,21	(81,62; 91,09)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	367	83,90	40,62	(79,17; 88,64)

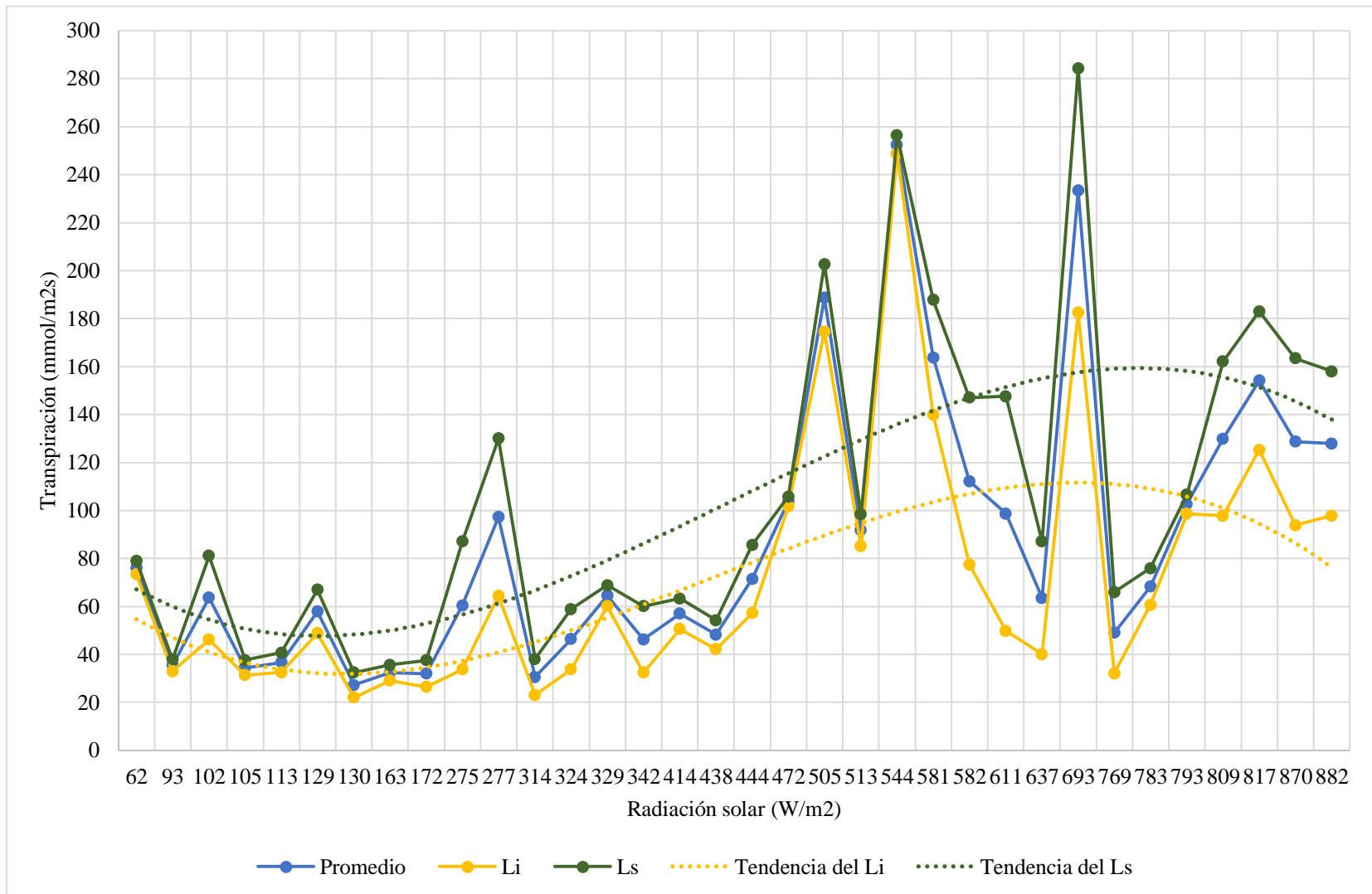


Figura 58. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas medias (12pm-6pm)

5.7 Hojas Bajas

5.7.1 Horario de medición: 6am a 12pm

Prosiguiendo nuestro análisis, en el Cuadro 73 se observa la correlación moderada entre las variables de HR de la planta y RS.

Cuadro 73. Correlaciones entre las variables explicativas junto con su valor de probabilidad (hojas bajas-6am-12pm)

Correlación de Pearson	-0,681
Valor p	0,000

En el Cuadro 74 se puede ver la ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas de 6 am a 12 pm. En este caso las dos variables involucradas presentaron significancia con la variable respuesta al cubo.

Esta ecuación no presenta diferencia con la ecuación de regresión múltiple de las hojas medias (en este mismo horario de medición), ya que se presentan las mismas variables significativas con la variable respuesta.

Se obtiene un porcentaje de 27,45 para el coeficiente de determinación. Si se compara este valor con el Cuadro 4, se tiene un coeficiente muy malo. La HR de la planta es la variable que presenta el mayor coeficiente, por consiguiente, es la variable que presenta mayor influencia con la variable respuesta.

Cuadro 74. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (6am-12pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	-1235 + 24,5 HR planta – 1,154 RS – 0,001237 (HR planta) ³ + 0,01631 RS*HR planta
---------------------------------------	---	---

Ahora veamos, el comportamiento de cada variable explicativa significativa con la variable respuesta. Esto con el fin de entender de una mejor manera lo visto anteriormente.

En la Figura 59 se puede ver la gráfica del comportamiento de la humedad relativa de la planta y la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición. Esta variable es significativa al cubo e interactuando con la RS. Se observa como con forme aumenta la humedad relativa de la planta la variabilidad de la transpiración es mayor. Este mismo comportamiento se observa en la variabilidad de la transpiración de las hojas medias con respecto a esta misma variable (mismo horario de medición).

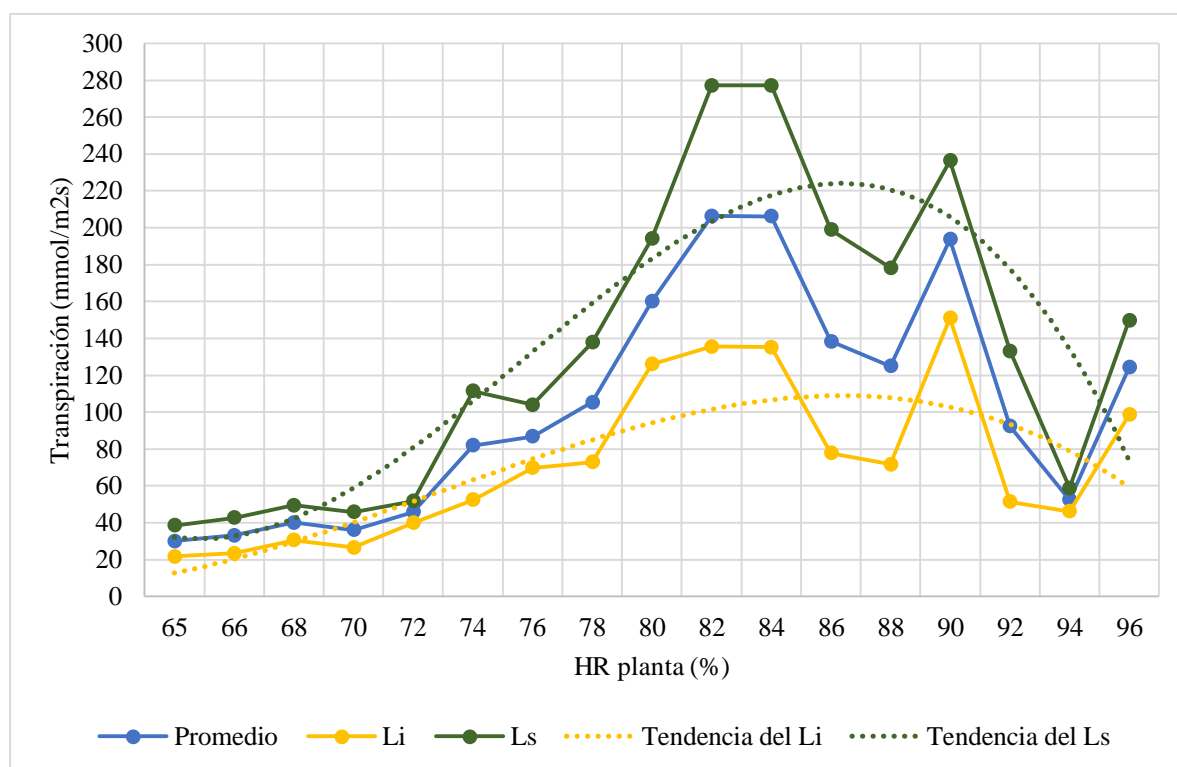


Figura 59. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (6am-12pm)

Seguidamente, en la Figura 60 se observa el comportamiento de la radiación solar con la transpiración de las hojas bajas en el horario de la mañana. La variabilidad de la transpiración es mayor con forme aumenta la RS. Esta variable presenta significancia al cubo.

Por otra parte, en el Cuadro 75 se puede ver que la diferencia entre la media de la transpiración medida con el instrumento y la calculada es de 4,24 mmol/m²s. Por lo que se concluye que las transpiraciones son similares y el modelo estadístico se ajusta a la realidad con una probabilidad del 51%.

Cuadro 75. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas bajas-6am-12pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	357	129,34	108,93	(120,49; 138,19)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	357	133,58	51,37	(124,73; 142,43)

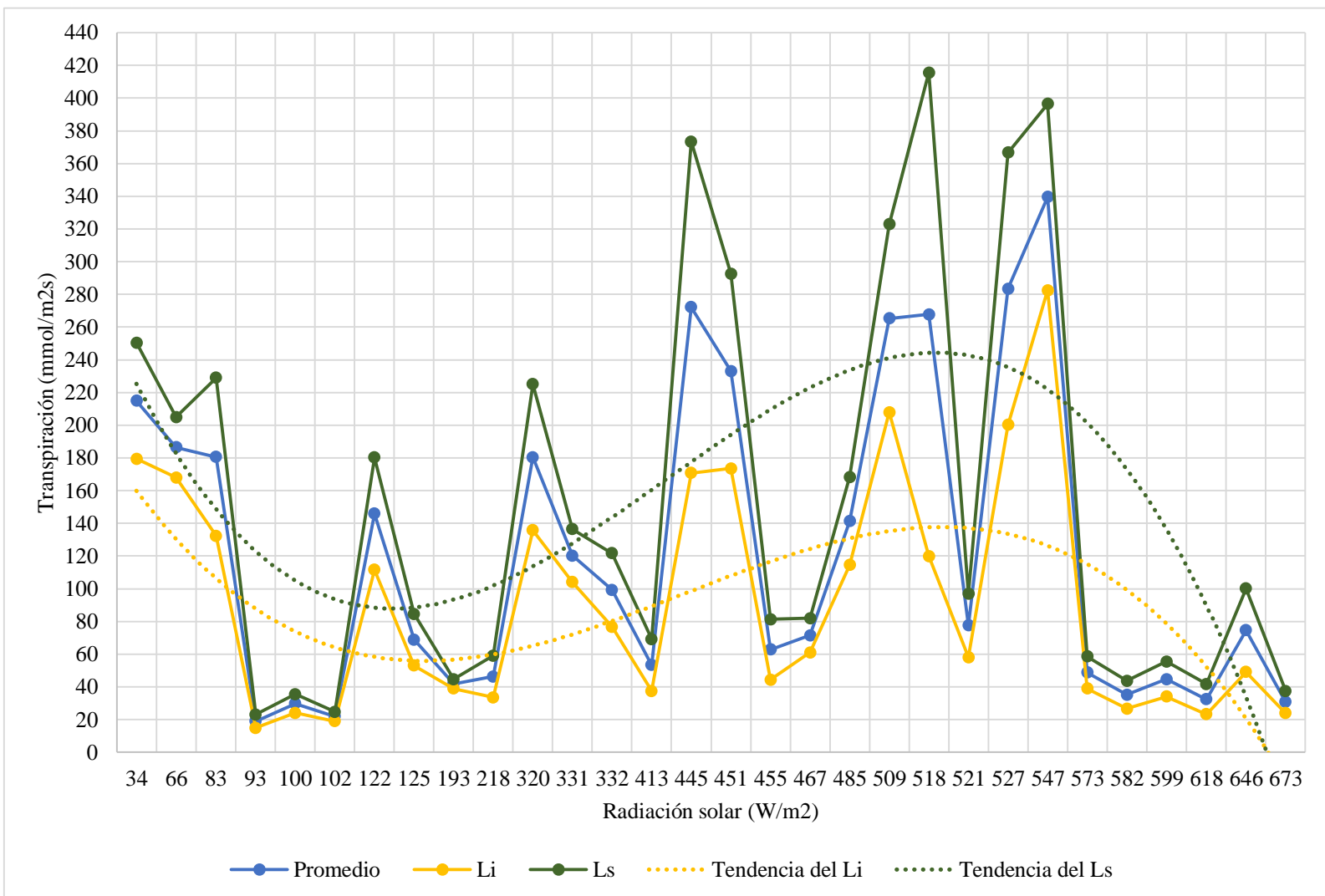


Figura 60. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas bajas (6am-12pm)

5.7.2 Horario de medición: 12pm a 6 pm

Avanzado en nuestro razonamiento, en el Cuadro 76 se observan las variables explicativas que muestran una relación lineal débil entre ellas y con el fin de evitar problemas de colinealidad, estas son las variables que se estudian en el análisis de regresión múltiple.

Cuadro 76. Correlaciones entre las variables explicativas con su respectivo valor de probabilidad (hojas bajas-12pm-6pm)

	HR planta	T invernadero
T invernadero	-0,396	
	0,000	
RS	-0,500	0,498
	0,000	0,000

En el Cuadro 77 se puede ver la ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas.

Se observa como la T del invernadero es la única variable que no influye al cubo con la transpiración (Esta es la diferencia que presenta la ecuación de la transpiración de las hojas bajas con la ecuación de la transpiración de las hojas medias y altas en este mismo horario de medición, ya que en estas la T del invernadero no es una variable significativa con la variable respuesta).

El coeficiente de determinación de este modelo estadístico nos dice que los predictores significativos explican el 72,72% de la variabilidad de la transpiración, un coeficiente de determinación bueno. La T del invernadero presenta el coeficiente más alto, si se compara con los demás.

Cuadro 77. Ecuación de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas (12pm-6pm)

Transpiración (mmol/m ² s)	=	167 – 5,15 HR planta + 13,68 T invernadero – 0,811 RS + 0,000664 (HR planta) ³ - 0,0000001 RS ³ + 0,01368 RS*HR planta – 0,2130 T invernadero*HR planta
---------------------------------------	---	--

Examinaremos ahora brevemente el comportamiento de cada variable explicativa significativa en el modelo estadístico con la variable respuesta.

En primer lugar, en la Figura 61 se observa el comportamiento de la HR de la planta junto con la transpiración de las hojas bajas. Se puede ver como la variabilidad de la transpiración es mayor con forme aumenta la HR de la planta. Esta variable en su forma cúbica es significativa con la variable respuesta y también interactuando con la RS y la T del invernadero.

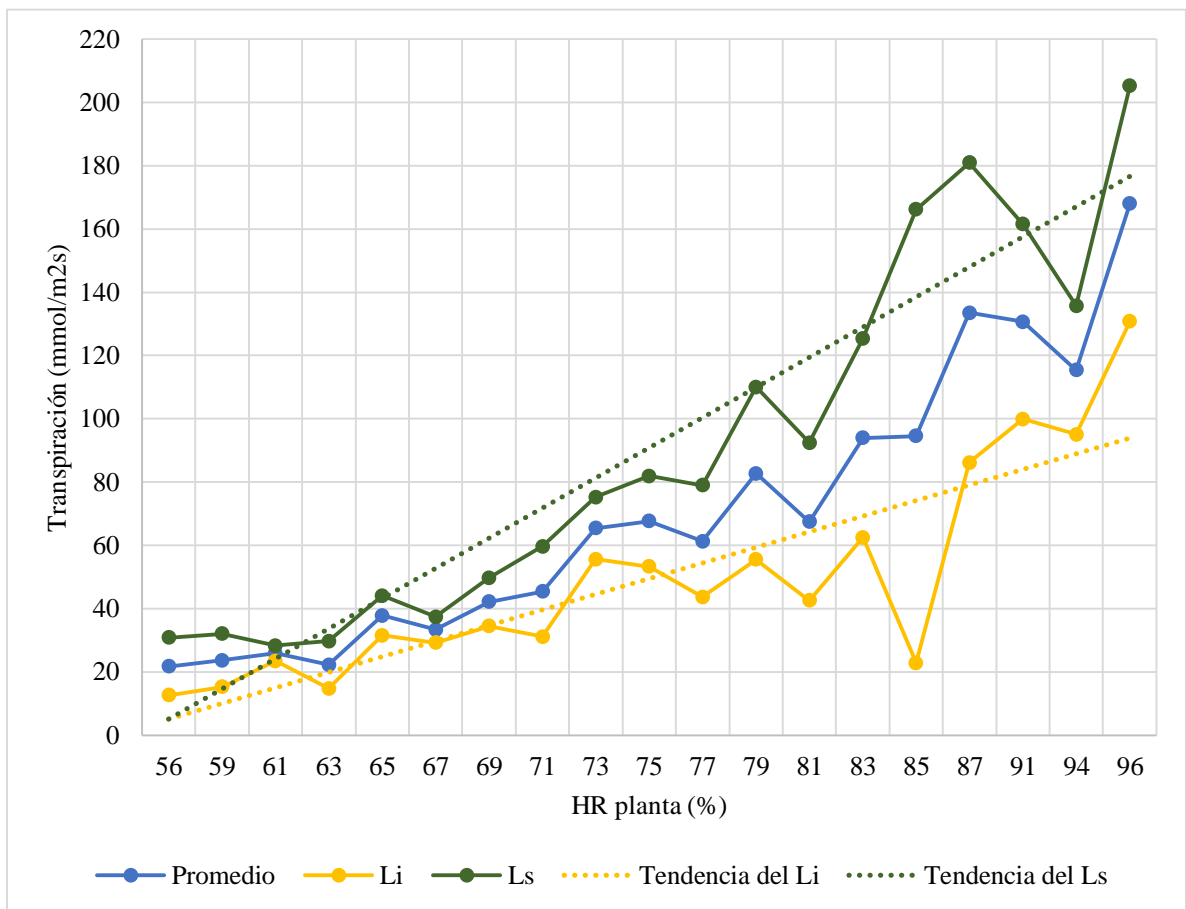


Figura 61. Gráfica de la humedad relativa de la planta versus la transpiración de las hojas bajas (12pm-6pm)

En segundo lugar, en la Figura 62 se muestra la gráfica de la T del invernadero y la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición. Con forme aumenta la temperatura del invernadero la variabilidad de la transpiración es mayor con excepción de una T del invernadero mayor a 30°C, que empieza a disminuir.

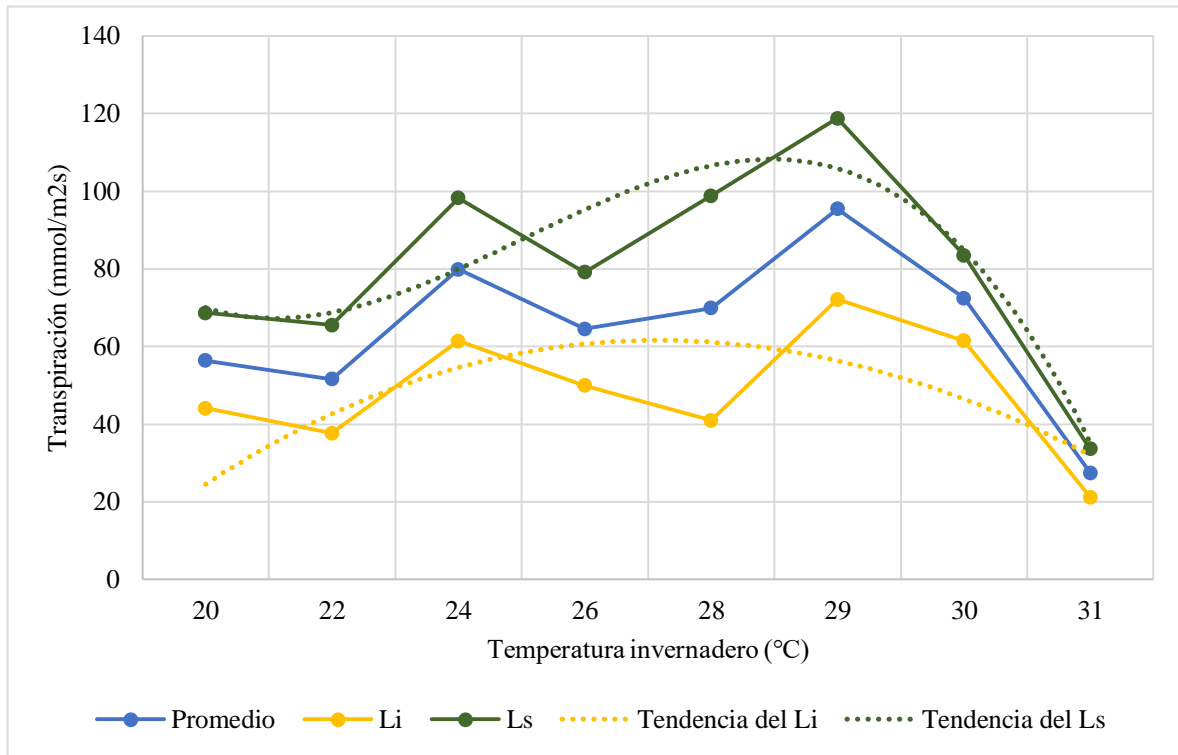


Figura 62. Gráfica de la temperatura del invernadero versus la transpiración de las hojas bajas (12pm-6pm)

En tercer lugar, se puede ver en la Figura 63 el comportamiento de la RS y la transpiración de las hojas bajas en este horario de medición. En este caso, la variabilidad de la transpiración es mayor con forme aumenta la RS. Esta variable influye de manera cúbica con la transpiración.

Finalmente, en el Cuadro 78 se muestra el intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración medida con el porómetro y la calculada con la ecuación propuesta para esta altura de hoja y horario de medición. Se observa una diferencia de 2,16 mmol/m²s. La probabilidad del modelo matemático es de 58%.

Cuadro 78. Intervalo de confianza del 95% para la media de la transpiración experimental y la calculada (hojas bajas-12pm-6pm)

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Transpiración experimental (mmol/m ² s)	279	73,55	49,14	(68,18; 78,91)
Transpiración calculada (mmol/m ² s)	279	75,71	41,84	(70,35; 81,08)

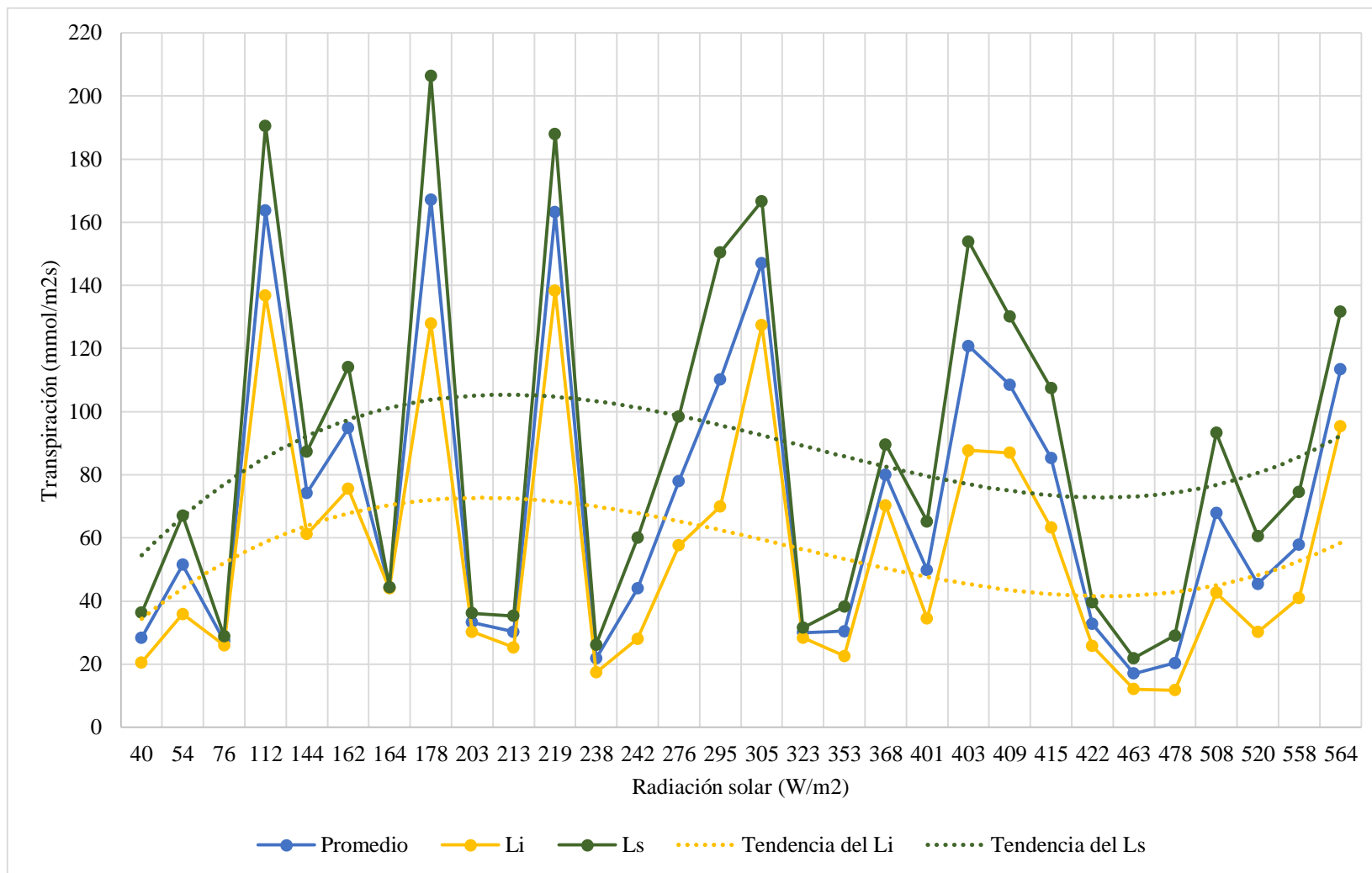


Figura 63. Gráfica de la radiación solar versus la transpiración de las hojas bajas (12pm-6pm)

5.8 Contenido relativo de agua (CRA)

En este apartado se muestra el contenido relativo de agua para cada tejido del cultivo en estudio. Esto se pudo obtener gracias a la Ecuación 11.

Aclarar que este estudio se realizó sin el CRA para los frutos, debido a que no se consideraron las fechas de cosecha y, por consiguiente, cabe la posibilidad de que no se consideraran en el estudio frutos que fueron cosechados (error muestral).

Hecha esta salvedad, en el Cuadro 79 se observan los promedios de CRA de cada tejido para tres plantas de chile Dulcético. Estos valores corresponden a una fecha de medición del 4/4/2019.

Si comparamos el CRA de cada tejido para esta fecha tenemos lo siguiente:

En la literatura se menciona que las raíces tienen un contenido de agua que va desde 48% a 94%, y en nuestra investigación las raíces contienen un porcentaje de 70,54%. Por lo que entra dentro del intervalo teórico.

El rango de CRA en las hojas es desde 77% a 98%, y en nuestro estudio las hojas dan como resultado un 83,45%.

Cuadro 79. Contenido relativo de agua para los tejidos de la planta de chile Dulcético en invernadero (4/4/2019)

	Promedio
CRA raíz (%)	70,54
CRA tallo (%)	83,89
CRA hojas (%)	83,45

Seguidamente, en el Cuadro 80 se puede ver el promedio de CRA de cada tejido para otras tres plantas. Estos valores corresponden a una fecha de medición del 4/5/2019. Esto se realizó con el fin de observar como cambiaba el CRA en los tejidos en un lapso de 30 días.

En el Cuadro 79 se puede ver como el CRA de la raíz y el tallo presentan porcentajes menores, si se comparan con el Cuadro 80. Esto se pudo deber a errores humano en la medición

o a una mala elección de la planta para el estudio (de las más pequeñas). Sin embargo, estos valores entran en el intervalo que propone la literatura de CRA para tejidos de planta.

El porcentaje de contenido relativo de agua para las hojas es de 84,04%. Un valor mayor que el mostrado en el Cuadro 79.

Cuadro 80. Contenido relativo de agua para los tejidos de la planta de chile Dulcético en invernadero (4/5/2019)

Promedio	
CRA raíz (%)	67,52
CRA tallo (%)	79,05
CRA hojas (%)	84,04

Por lo que se refiere a el contenido de agua que se presenta en una ha en un día, se presenta el Cuadro 81. Importante mencionar que este contenido de agua se da entre el primer día que se instaló el cultivo hasta el 4 de abril del presente año (2019).

Para este tipo de comparación no se tomó en cuenta la cosecha ya que al no ser la debida puede generar cambios y dar valores erróneos.

Cuadro 81. Agua que contiene la planta de chile Dulcético bajo ambiente protegido (del 2 de noviembre del 2018 hasta el 4 de abril del 2019)

02/11/2018	Peso del agua sin cosecha (g)	Agua que contienen las 3 plantas en un lapso de tiempo de 153 días (g)	Agua que contiene una planta en un lapso de tiempo de 153 días (g)	Agua que contiene una ha en un lapso de tiempo de 153 días (kg/ha)	Agua que contiene una ha en un día (kg/ha)	Agua que contiene una ha en un día (kg/m²)
-	-					
04/04/2019		813,80	271,27	5520,01	36,08	0,003607847
Suma	813,80					

Seguidamente, en el Cuadro 82 se presenta el contenido de agua de una ha en un día para un lapso de 30 días desde el 4 de abril del 2019.

Si comparamos el agua que se queda en la planta entre los Cuadros 81 y 82 se obtiene que al paso del tiempo aumenta el contenido de agua en la planta. Esto debido al crecimiento de la planta, a mayor edad mayor requerimiento de agua para realizar todas sus funciones adecuadamente.

Cuadro 82. Agua que contiene la planta de chile Dulcético bajo ambiente protegido (del 4 de abril hasta el 4 de mayo del 2019)

04/04/2019	Peso del agua sin cosecha (g)	Agua que contienen las 3 plantas en un lapso de tiempo de 30 días (g)	Agua que contiene una planta en un lapso de tiempo de 30 días (g)	Agua que contiene una ha en un lapso de tiempo de 30 días (kg/ha)	Agua que contiene una ha en un día (kg/ha)	Agua que contiene una ha en un día (kg/m ²)
Suma	813,80					
04/05/2019		456,90	152,30	3099,15	103,31	0,0103305
Suma	1270,70					

El siguiente aspecto trata sobre la evaluación del impacto ambiental y social presentes:

5.9 Análisis ambiental

En el Cuadro 83 se puede ver la matriz Arboleda de la evaluación de impacto ambiental. Se observa un impacto ligeramente negativo (-1,479). Sin embargo, con medidas de mitigación se puede llegar a controlar este impacto.

Algunas de las medidas de mitigación son:

- Vigilancia de las operaciones de descarga y transporte del material para evitar la emisión de partículas de polvo
- Recoger los residuos diarios a manera de hacer un desarrollo y finalización de obra detalladamente. Se deberá contar con recipientes adecuados para el almacenamiento seguro de los residuos producidos.
- Los productos químicos deberán ser almacenados en estanterías y no se dispondrán directamente sobre el suelo.

- Adecuada disposición final de las bolsas plásticas utilizadas en el cultivo de chile Dulcético.

Cuadro 83. Evaluación de impacto ambiental para la investigación propuesta

Fase	Descripción del impacto	Factor		Clase	Presencia	Duración	Evolución	Magnitud	Ca	Impacto ambiental	Clasificación ambiental	
											-	+
Preparación del sitio	Disminución de cobertura vegetal (Desmonte)	Suelo	Físico	-1	0,8	0,06	0,7	1	-4,064	Irrelevante	-4,064	
	Pérdida de materia orgánica	Suelo	Físico	-1	0,6	0,05	0,7	0,4	-1,266	Irrelevante	-1,266	
	Generación de residuos	Suelo	Físico	-1	0,5	0,01	0,7	0,39	-0,9705	Irrelevante	-0,9705	
	Incremento de la emisión de partículas de polvo (transporte de suelo)	Aire	Físico	-1	0,5	0,01	1	0,2	-0,715	Irrelevante	-0,715	
	Aumento de la emisión de gases del efecto invernadero (uso de bolsas plásticas)	Aire	Físico	-1	0,7	0,19	0,9	0,7	-3,486	Irrelevante	-3,486	
	Generación de empleo	Económico	Social	1	1	0,19	0,99	0,4	3,342	Moderado		3,342
Uso de agroquímicos	Alteración en la composición química del suelo	Suelo	Físico	-1	0,6	0,09	0,7	0,5	-1,632	Irrelevante	-1,632	
	Aumenta la contaminación del agua	Agua	Físico	-1	0,5	0,05	0,8	0,4	-1,195	Irrelevante	-1,195	
	Disminución de la fertilidad del suelo	Suelo	Físico	-1	0,4	0,04	0,7	0,5	-1,028	Irrelevante	-1,028	
	Fortalecimiento buenas prácticas agrícolas	Cultural	Social	1	0,6	1	0,19	0,99	2,59	Moderado		2,59
	Generación de empleo por parte de las entidades que venden los productos	Económico	Social	1	1	0,19	0,99	0,4	3,342	Moderado		3,342
	Generación de malos olores	Aire	Físico	-1	0,4	0,01	1	0,19	-0,544	Irrelevante	-0,544	
Riego localizado	Aumento de la salinación en suelo	Suelo	Físico	-1	0,5	0,05	0,7	0,4	-1,055	Irrelevante	-1,055	
	Disminución del caudal	Agua	Físico	1	0,6	0,19	0,99	0,7	3,25	Moderado		3,25
Cosecha y poscosecha	Generación de residuos	Suelo	Físico	-1	0,6	0,12	0,7	0,4	-1,392	Irrelevante	-1,392	
	Aumento de mano de obra	Económico	Social	1	1	0,19	0,99	0,4	3,342	Moderado		3,342
Total absoluto											-17,348	15,869
Impacto Neto											-1,479	

5.10 Análisis social

En este caso se responden las preguntas planteadas en la literatura para un adecuado análisis.

¿Quiénes son los beneficiarios de este proyecto?

Los beneficiarios de esta investigación son los agricultores, grandes y pequeños productores y la población en general.

¿De qué manera se benefician con el proyecto?

La manera de beneficiarse es que debido a este conocimiento de saber el agua que transpira un tipo de cultivo se puede llegar a optimizar el uso del agua.

¿Qué otros impactos sociales generan este proyecto?

Un impacto social a destacar es el cambio de conciencia y la costumbre de regar cultivos y desperdiciar enormes cantidades de agua.

Bien se conoce que el agua es un recurso agotable y el conocimiento de este tipo de parámetros nos ayuda a generar ese cambio para mitigar el daño que el ser humano le ha provocado a la naturaleza y la toma sin medida de recurso.

La vida no sería posible sin el agua y, por lo tanto, la toma de conciencia deja de ser solo importante para convertirse en una acción necesaria para la humanidad. Y más en la agricultura que utiliza el 70% del agua dulce disponible.

Según Ávila, García y Villalobos (2017) la agricultura consume el 70% del agua dulce que se extrae en el mundo. A lo largo del siglo XX el consumo mundial de agua aumentó casi diez veces más. No obstante, gracias a la tecnología, desarrollo industrial y técnicas amigables con el ambiente la utilización de este recurso ha disminuido significativamente. De consumir el 90% a inicios de siglo, disminuyó el 62% a finales de este.

No se realizó un análisis con la matriz Vester debido a que este requiere mínimo de 13 problemas y esta investigación no los abarca. Sin embargo, contestando las preguntas anteriores se observa que su impacto social si es significativa y de importancia.

6.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados y el análisis desarrollado anteriormente es posible concluir lo siguiente:

- Se afirma la complejidad de los sistemas de los seres vivos debido a que la transpiración de las plantas es un parámetro definido por varias variables explicativas y cambia a través de las horas. El hecho de que se descarten del análisis de regresión múltiple algunas variables para evitar problemas de multicolinealidad, no quiere decir que no sean influyentes. Ya que cuando aumenta la radiación solar, también, lo hace la temperatura, por ejemplo. Es decir, la eliminación de las variables correlacionadas es porque se busca un modelo estadístico lineal sin una matriz con determinante cero o muy cercano a cero.
- Los modelos estadísticos para la transpiración de las hojas altas son los siguientes (también se observa el porcentaje de probabilidad de cada modelo estadístico, por lo que se concluye que cada ecuación representa correctamente la transpiración experimental):
 - ✓ Horario de medición de 6am a 8am: $-402,6 + 4,873 \cdot \text{HR planta} - 0,836 \cdot \text{RS} + 0,01429 \text{ RS} \cdot \text{HR planta}$. El modelo estadístico propuesto presenta una probabilidad del 99%.
 - ✓ Horario de medición de 9am a 11am: Este modelo matemático presenta una probabilidad del 98% y el modelo es: $211,4 - 1,508 \cdot \text{HR invernadero} - 0,469 \cdot \text{RS} + 0,00720 \cdot \text{RS} \cdot \text{HR invernadero}$.
 - ✓ Horario de medición de 1pm a 3pm: $-3448 + 98,6 \cdot \text{T planta} + 126,9 \cdot \text{T invernadero} + 1,025 \cdot \text{RS} - 0,0349 \cdot \text{RS} \cdot \text{T invernadero} - 3,55 \cdot \text{T invernadero} \cdot \text{T planta}$. Con una probabilidad del 45% para el modelo estadístico en este horario de medición.
 - ✓ Horario de medición de 3pm a 5pm: $-203,4 + 3,572 \cdot \text{HR planta} + 0,382 \cdot \text{RS} - 0,00498 \text{ RS} \cdot \text{HR planta}$. Este modelo estadístico presenta una probabilidad del 94%.
 - ✓ Horario de medición de 6am a 12pm: $-1456 + 26,23 \cdot \text{HR planta} + 0,3680 \cdot \text{RS} - 0,0000004 \cdot \text{RS}^3 - 0,001170 \cdot (\text{HR planta})^3$. Con un 86% de probabilidad para el modelo matemático propuesto.

- ✓ Horario de medición de 12pm a 6pm: $5067 - 82,92*HR \text{ planta} - 120,1*T \text{ planta} + 0,01062*RS + 0,002867*(HR \text{ planta})^3$. La probabilidad de este modelo estadístico es del 95%.
- Los modelos estadísticos para la transpiración de las hojas medias son (con el porcentaje de probabilidad de cada modelo estadístico se comprueba que este se ajusta a el comportamiento de la transpiración experimental):
 - ✓ Horario de medición de 6am a 8am: $838 - 14,38*HR \text{ planta} - 63,8*T \text{ planta} - 3,029*RS + 0,000596*RS^2 + 0,03307 RS*HR \text{ planta} + 1,0004 HR \text{ planta}*T \text{ planta}$. En este caso se presenta una probabilidad del 99% para el modelo de regresión múltiple.
 - ✓ Horario de medición de 9am a 11am: $606 + 9,085*HR \text{ planta} - 41,9*T \text{ planta} - 24,37*HR \text{ invernadero} + 0,852*HR \text{ invernadero}*T \text{ planta}$. Se tiene una probabilidad del 84%.
 - ✓ Horario de medición de 1pm a 3pm: $-3740 + 50,8*HR \text{ planta} + 121,0*T \text{ invernadero} + 0,07738*RS - 1,624*T \text{ invernadero}*HR \text{ planta}$. La probabilidad del modelo matemático es 34%.
 - ✓ Horario de medición de 3pm a 5pm: $-532,5 + 7,013*HR \text{ planta} + 1,145*RS - 0,000387*RS^2 - 0,01081 RS*HR \text{ planta}$. Con un 99% de probabilidad para la ecuación de regresión múltiple.
 - ✓ Horario de medición de 6am a 12pm: $1187 - 20,19*HR \text{ planta} - 1,343*RS + 0,000924*(HR \text{ planta})^3 + 0,0000001*RS^3 + 0,01835*RS*HR \text{ planta}$. La probabilidad del modelo es del 23%.
 - ✓ Horario de medición de 12pm a 6pm: $-1539 + 12,59*HR \text{ planta} + 49,81*HR \text{ invernadero} - 0,1019*RS + 0,002463*(HR \text{ planta})^3 + 0,0000001*RS^3 - 0,7365*HR \text{ invernadero}*HR \text{ planta}$. En este caso el modelo estadístico presenta una probabilidad del 47%.
- Las ecuaciones de regresión múltiple para la transpiración de las hojas bajas son (con el porcentaje de probabilidad de cada modelo estadístico se comprueba que este se ajusta a el comportamiento de la transpiración experimental):

- ✓ Horario de medición de 6am a 8am: $-1142 + 14,88*HR \text{ planta} + 1,289*RS + 0,001335*RS^2 - 0,02391*RS*HR \text{ planta}$. Este modelo matemático presenta una probabilidad del 98%.
- ✓ Horario de medición de 9am a 11am: $-13240 + 110,2*HR \text{ planta} + 382,4*T \text{ planta} - 40,1*T \text{ invernadero} + 12,46*RS - 0,05485*RS*HR \text{ planta} - 0,3411*RS*T \text{ planta} + 0,0592 RS*T \text{ invernadero} - 2,292 HR \text{ planta}*T \text{ planta}$. La probabilidad del modelo estadístico es de 88%.
- ✓ Horario de medición de 1pm a 3pm: $1444 + 8,63*T \text{ planta} - 8,02*T \text{ invernadero} - 33,91*HR \text{ invernadero} - 18,53*HR \text{ planta} + 0,4499*HR \text{ invernadero}*HR \text{ planta}$. Se tiene un porcentaje de 95 para la probabilidad del modelo matemático propuesto.
- ✓ Horario de medición de 3pm a 5pm: $-2907 + 33,57*HR \text{ planta} + 96,2*T \text{ invernadero} + 1,776*RS - 0,0555*RS*T \text{ invernadero} - 1,089*T \text{ invernadero}*HR \text{ planta}$. En este caso la probabilidad del modelo es del 92%.
- ✓ Horario de medición de 6am a 12pm: $-1235 + 24,5*HR \text{ planta} - 1,154*RS - 0,001237*(HR \text{ planta})^3 + 0,01631*RS*HR \text{ planta}$. La probabilidad del modelo estadístico es del 51%.
- ✓ Horario de medición de 12pm a 6pm: $167 - 5,15*HR \text{ planta} + 13,68*T \text{ invernadero} - 0,811*RS + 0,000664*(HR \text{ planta})^3 - 0,0000001*RS^3 + 0,01368*RS*HR \text{ planta} - 0,2130*T \text{ invernadero}*HR \text{ planta}$. Se tiene una probabilidad del 58% para la ecuación de regresión múltiple propuesta en este horario de medición.

- Con forma la planta crece, el contenido de agua relativa que posee cada tejido de la planta aumenta.
- Económicamente, se puede concluir que el proyecto tiene un costo de $\text{C}\$6,190,000.00$. Mencionar que no se realizó un análisis económico con VAR y TIR porque no es menester para esta investigación. Debido a que solo se cuenta con el monto invertido en la investigación. Además, no hay una manera por la cual se pueda remunerar el dinero invertido y empezar a obtener beneficios en este proyecto.

- Ambientalmente, se puede concluir que la matriz Arboleda da un impacto negativo (-1,479), sin embargo, es un valor muy pequeño y se puede mitigar con ciertas actividades que disminuyan el impacto. Entre las actividades se menciona: Una adecuada disposición final para las bolsas plásticas, vigilar la descarga de suelo, recoger los residuos diarios y tener un almacenamiento adecuado para ellos, entre otras.
- Socialmente, se puede concluir que el mayor impacto es el cambio de conciencia y costumbre para un adecuado uso del agua al regar un tipo de cultivo.
- Se recomienda un buen mantenimiento del invernadero, ya que en el que se realizó la investigación presentaba ciertas anomalías (agujeros en el plástico que cubre el ambiente protegido) que pudieron dar lugar a errores muestrales. Recordar que el viento es un factor externo influyente en la transpiración y por ende cabe la posibilidad de que pudo provocar ciertos cambios en las mediciones. (Ver Anexo 3)
- Se recomienda realizar una investigación sobre la productividad del cultivo aplicando las ecuaciones vistas anteriormente.

7.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amón, I. (2010). *Guía metodológica para la selección de técnicas de depuración de datos*. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/2033/1/71644758.20101.pdf>

Arbeláez-Salazar, O., Botero-Arbeláez, M. y Mendoza-Vargas, J. (2007). *Método anova utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición*. Recuperado de: <file:///C:/Users/jafet%20mendez/Downloads/Dialnet-MetodoAnovaUtilizadoParaRealizarElEstudioDeRepetib-4787724.pdf>

Arboleda, J. (2008). *Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: http://tecdigital.tec.ac.cr/dotlrn/classes/IA/IA5601/S-2-2016.CA.IA5601.1/file-storage/view/public/examen-parcial-ii/eia/impacto-ambiental/1_Manual_EIA.pdf

Avendaño, C., Huerta, M., Kelso, H., Lobato, R., Quiroz, J. y Reyes, D. (2015). *Caracterización estomática de cinco especies del género Vanilla*. Recuperado de: http://www.mag.go.cr/rev_meso/v26n02_237.pdf

Ávila, F., García, M. y Villalobos, V. (2017). *El agua para la agricultura de las Américas*. Recuperado de: <http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/6148/1/BVE17109367e.pdf>

Azcón, J. y Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Recuperado de: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/itcrsp/reader.action?docID=3229499&query=transpiraci%C3%B3n+de+las+plantas>

Behar, R., Salcedo, A. y Yáñez, G. *Interpretación de intervalos de confianza. el caso de estudiantes colombianos y venezolanos*. Recuperado de: <file:///C:/Users/jafet%20mendez/Downloads/Interpretacindeintervalosdeconfianza.ElCasodeEstudiantesColombianosyVenezolanos.pdf>

Barón-López, F. y Téllez-Montiel, F. (s.f.). *Capítulo 5: Diferencias que presenta una variable numérica entre varios grupos*. Recuperado de: <https://www.bioestadistica.uma.es/baron/apuntes/ficheros/cap05.pdf>

Beluzán, F. (2013). *Déficit de presión de vapor (DPV) y factores microclimáticos como herramientas de pronóstico de Botrytis cinerea Pers. ex fr., en Lactuca sativa L. bajo invernadero*. Recuperado de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/egb453d/doc/egb453d.pdf>

Borrego, F., Mendoza, M. y Santiago, J. (1998). *Evaluación de tomate (Lycopersicon esculentum, MILL) en invernadero: criterios fenológicos y fisiológicos*. Recuperado de: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/24633/24837>

Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Gulías, J., Mendrano, H. y Ribas, M. (2007). *Eficiencia en el uso del agua por las plantas*. Recuperado de: <file:///C:/Users/pc/Downloads/eficiencia-en-el-uso-del-agua-por-las-plantas-0.pdf>

Calvache, M. (s.f.). *Manejo del agua: Principios fundamentales*. Recuperado de: <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/5-Manejo-del-agua-Principios-fundamentales-Calvache-M..pdf>

Camacho, G. (2017). *Evaluación económica para la producción del híbrido de chile dulce (Capsicum annuum) "Dulcítico" en invernadero, mediante el enfoque de presupuestos parciales, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica*. Recuperado de: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/4335/1/41639.pdf>

Cánovas, A., Martínez-Ortega, M., Martínez-Ortega, M., Pérez-Abreu, A. y Tuyá-Pendás, L. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman. Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017

Cañizales, A., Perozo, Y., Rodríguez, D. y Sanabria, M. (2003). *Características de los estomas, índice y densidad estomática de las hojas de lima Tahití (Citrus latifolia Tanaka)*

injertada sobre ocho patrones cítricos. Recuperado de:
[file:///C:/Users/jafet%20mendez/Downloads/Dialnet-
CaracteristicasDeLosEstomasIndiceYDensidadEstomati-2221542.pdf](file:///C:/Users/jafet%20mendez/Downloads/Dialnet- CaracteristicasDeLosEstomasIndiceYDensidadEstomati-2221542.pdf)

Cardemil, L., Handford, M. y Meisel, L. (2007). *La célula vegetal*. Recuperado de:
<http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/LaCelulaVegetal.pdf>

Casal, J. (2007). *Las plantas, entre el suelo y el cielo*. Recuperado de:
[https://ebookcentral.proquest.com/lib/itcrsp/reader.action?docID=3186051&query=transpiraci
%C3%B3n+en+las+plantas+](https://ebookcentral.proquest.com/lib/itcrsp/reader.action?docID=3186051&query=transpiraci%C3%B3n+en+las+plantas+)

Castillo-Morales, A., García-Villalpando, J., Larqué-Saavedra, M., Ramírez-Guzmán, M. y Rendón-Sánchez, G. (2001). *Comparación de los procedimientos de TUKEY, DUNCAN, DUNNETT, HSU Y BECHHOFER para selección de medias*. Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/pdf/302/30235107.pdf>

Chavarría, A. (2013). *Relación suelo-agua-planta*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.

Chávez, P., Mullan, D., Pask, A., Pietragalla, J. y Reynolds, M. (2013). *Fitomejoramiento Fisiológico II: Una Guía de Campo para la Caracterización Fenotípica de Trigo*. Recuperado de:
<https://pdfs.semanticscholar.org/e3c8/7c126d9b3cba7907b4717ae8f58b1a8b7be8.pdf>

Chumacero, J. (2015). *Detección de la multicolinealidad y heteroscedasticidad (aplicaciones en EVIEWS – STATA)*. Recuperado de:
https://economia.unmsm.edu.pe/data/doc_trab/17-2015-OBG.pdf

Dalmas, N. y Sanfilippo, J. (2012). *El contenido relativo de agua como indicador foliar en trigo para selección de genotipos y el manejo del cultivo*. Recuperado de:
http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/rdata/tesis/a_dalelc349.pdf

Dell'Amico, J., Morales, D., Rodríguez, P., Sánchez, M. y Torrecillas, A. (2006). *Efecto de altas temperaturas del crecimiento y el intercambio gaseoso en plantas de tomate*

(*Lycopersicon esculentum* Mill. CV. AALIA). Recuperado de:
[file:///C:/Users/jafet%20mendez/Downloads/399-1120-1-PB%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/jafet%20mendez/Downloads/399-1120-1-PB%20(1).pdf)

Dicovski, L. (2008). *Estadística Básica*. Recuperado de:
http://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/2101/mod_resource/content/0/DEPOSITO_DE_MATERIALES/estadistica1_1_.pdf

Eichhorn, S., Evert, R. y Raven, P. (1992). *Biología de las plantas*. Recuperado de:
https://books.google.co.cr/books?id=xvNd3udrh1YC&pg=PA541&lpg=PA541&dq=stephen+hales+y+la+transpiracion&source=bl&ots=jne-NIOG-G&sig=ACfU3U00dp59ejZTNjRB_EfR2RSvWvu1EQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjI7b2Z8b3IAhVIjK0KHxz6BIkQ6AEwEnoECAkQAQ#v=onepage&q=stephen%20hales%20y%20la%20transpiracion&f=false

Elizondo, E. y Monge, J. (2017). *Evaluación de calidad y rendimiento de 12 genotipos de chile dulce (Capsicum annum L.) cultivados bajo invernadero en Costa Rica*. Recuperado de: <http://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v30n2/0379-3982-tem-30-02-00036.pdf>

Estuardo, G. (2012). *Estadística y probabilidades*. Recuperado de:
<http://www.x.edu.uy/inet/EstadisticayProbabilidad.pdf>

Esquivia-Camargo. (1992). *Tolerancia a la sequía en clones de Mandioca*. Recuperado de: https://digital.csic.es/bitstream/10261/131333/1/Tolerancia_sequia_clones_mandioca.pdf

Fallas, J. (2012). *Análisis de Varianzas*. Recuperado de:
http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/analisis_de_varianza_2012.pdf

Fallas, J. (2012). *Correlación lineal*. Recuperado de:
http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/correlacion_lineal_2012.pdf

Fallas, J. (2012). *Regresión lineal simple y múltiple*. Heredia: EUNA.

Fermín, W. y Marcano, L. (2013). *Comparación de métodos de detección de datos anómalos multivariantes mediante un estudio de simulación*. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/4277/427739462009.pdf>

Fernández-Palomio, C. (2015). *Frecuencia de precipitaciones máximas según los momentos en la cuenca hidrográfica del lago Titicaca*. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2161/P10-F47T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Fontana, J. (2014). *Principios de ecología*. Recuperado de: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/itcrsp/reader.action?docID=4183310&query=temperatura%2Bambiental%2Bde%2Blas%2Bplantas>

Franco, G., García, E., Hernández, M. y Matus, R. (2006). *Estadística*. Recuperado de: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/itcrsp/reader.action?docID=3187261&query=estadistica#>

González, B. y Murillo, C. (2000). *Manual de Ecometría*. Recuperado de: https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/6/6090/Manual_de_Econometria_9.pdf

González, O. (2016). *Coefficiente de correlación de Pearson y Spearman*. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/OsmeyGonzlez/coeficiente-de-correlacion-64171836>

Herrera, V. (2015). *Identificación y estudio de expresión de dos genes relacionados con la abertura y cierre de estomas en Opuntia ficus-indica y Pereskia sacharosa (Cactaceae)*. Recuperado de: <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11317/444/406627.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Huertas, L. (2008). El control ambiental en invernaderos: humedad relativa. *Revista Horticultura*. 52-54. Recuperado de: <http://www.horticom.com/pd/imagenes/69/757/69757.pdf>

Hugalde, I. y Villa, H. (2014). *Comportamiento isohídrico o anisohídrico en vides... ¿Una controversia sin fin?* Recuperado de: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142014000100012

Impacto social, económico y ambiental. (s.f.). Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/429106179/Impacto-Social>

Inzunza, S., Ramírez, G. y Sánchez, E. (2014). *Probabilidad y Estadística II*. Recuperado de: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/itcrsp/reader.action?docID=3229229&query=estadistica>

Lahura, E. (2003). *El coeficiente de correlación y correlaciones espúreas*. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/6445817.pdf>

León, M. & Squeo, F. (2007). *Transpiración*. Recuperado de: <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Transpiracion.pdf>

Marconi, J. (2011). *El suelo*. Recuperado de: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/itcrsp/detail.action?docID=3202031>

Melgar-Hiraldo, M., Ordaz-Sanz, J. y Rubio-Castaño, C. (s.f.). *Métodos estadísticos y econométricos en la empresa y para finanzas*. Recuperado de: https://www.upo.es/export/portal/com/bin/portal/upo/profesores/jaordsan/profesor/1311101268463_mxtodos_estadxsticos_y_economxtricos_en_la_empresa_y_para_finanzas.pdf

Menéndez, F. (2002). *Residuos, Residuos studentizados y valores DFFIT. Su uso en Regresión Lineal Simple y Múltiple*. Recuperado de: <http://tabarefernandez.tripod.com/coco2.pdf>

Mete, M. R. (2014). VALOR ACTUAL NETO Y TASA DE RETORNO: SU UTILIDAD COMO HERRAMIENTAA PARA ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN. *Instituto de Investigacion en Ciencias Económicas y Financieras*, 67-85.

Ministerio de Agricultura y ganadería. (2007). *Agrocadena Regional Cultivo Chile Dulce*. Recuperado de: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E70-4281.pdf>

Montero-Granados, R. (2016). *Modelos de regresión lineal múltiple*. Recuperado de: https://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion_lineal.pdf

Marconi, J. (2011). *El suelo*. Recuperado de: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/itcrsp/detail.action?docID=3202031>

Moriconi, V. (2011). *Las tesinas de Belgrano*. Recuperado de: http://repositorio.ub.edu.ar/bitstream/handle/123456789/657/493_moriconi.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Orellana, L. (2008). *Análisis de regresión*. Recuperado de: http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2011/1/clase%20regresion%20simple.pdf

Pirol, R. (s.f.). *Validación de la regresión mediante el análisis de homocedasticidad*. Recuperado de: <http://upav-biblioteca.org/site/wp-content/uploads/2018/02/Validacion-de-la-Regresion-Mediante-el-analisis-de-Homocedasticidad.pdf>

Reguant-Álvarez, M., Torrado-Fonseca, M. y Vilá-Baños, R. (2018). *La relación entre dos variables según la escala de medición con SPSS*. Recuperado de: <file:///C:/Users/pc/Downloads/21733-51454-4-PB.pdf>

Rivas, D. (2010). *Métodos estadísticos I Análisis de residuos*. Recuperado de: [http://webdelprofesor.ula.ve/economia/drivas/materias/metodosI\(M\)/Analisis%20de%20Residuos.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/economia/drivas/materias/metodosI(M)/Analisis%20de%20Residuos.pdf)

Rivero, N. (2018). *Mantenimiento y manejo de invernaderos*. Recuperado de: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/itcrsp/reader.action?docID=5486528&query=invernaderos>

Rodríguez, F., Sotelo, K., Suescun, S. y Urrea, J. (s.f.). *Contenido de agua en la biomasa*. Recuperado de: https://www.academia.edu/37508596/Informe_agua_biomasa

Rodríguez, K. (2017). Análisis físico del suelo (determinación de la humedad gravimétrica). Recuperado de: <https://es.slideshare.net/KenyiNikoIRodriguez/informe-n2-humedad-gravimetrica>

Rojo, J. (2007). *Regresión lineal múltiple*. Recuperado de: http://humanidades.cchs.csic.es/cchs/web_UAE/tutoriales/PDF/Regresion_lineal_multiple_3.pdf

Romero, J. (2012). *Análisis de la dinámica hídrica de plantas tipo C3. Caso de estudio: Cultivo de Maracuyá (Passiflora edulis variedad flavicarpa) en condiciones de clima templado*. Recuperado de: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/3828/3TesisJonathanRomeroHidro sistemas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ruberto, A. (Noviembre de 2006). *GUIA METODOLOGICA PARA LA EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL*. Obtenido de http://centro.paot.mx/documentos/varios/guia_metodologica_impacto_ambiental.pdf

Salazar -Navarro, J. (2016). *Aprovechamiento de recursos y manejo de suelo ecológico*. Recuperado de: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/itcrsp/detail.action?docID=5486554>

Silva, C. (2016). *Transpiración*. Recuperado de: <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Guiadeestudio-Transpiracion.pdf>

Universidad de Barcelona. (s.f.). Elementos claves en el estudio económico de un proyecto. Recuperado de: <https://www.obs-edu.com/int/blog-project-management/etapas-de-un-proyecto/elementos-claves-en-el-estudio-economico-de-un-proyecto>

Vargas, E. y Vargas, E. (2013). Medición de la potencia de pruebas de comparación múltiple de medias para experimentos desbalanceados con el uso de simulación de muestras. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/2756/a35206da3928ba6a3f9d4ae0db9d6d8e3f61.pdf>

Villaseñor, D. (2016). *Fundamentos y procedimientos para análisis físicos morfológicos del suelo*. Recuperado de:
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/10690/1/FUNDAMENTOS%20Y%20PROCEDIMIENTOS.pdf>

8.ANEXOS

8.1 Anexo 1: Método de Bouyoucos

Se tomó una muestra de suelo a una profundidad de 15 cm. El suelo fue secado al horno a 105°C por 24 horas y después fue tamizado por una malla ASTM # 10 (abertura 2 mm).

Se pesó 40 g de suelo y luego se le agregó 200 ml de agua destilada y 10 ml de agente dispersante (hexametáfosfato de sodio) y se llevó a la batidora por 15 minutos.

Luego se pasó la muestra a una probeta y se le agregó agua destilada hasta llegar a un volumen de un litro con el hidrómetro dentro. Con ayuda de un agitador se agitó la muestra con el objetivo de separar bien del fondo cualquier suelo que ya se haya sedimentado.

Después se sumergió cuidadosamente el hidrómetro y se tomó la primera lectura a los 40 segundos. Se sacó cuidadosamente el instrumento, se lavó con agua destilada y después de 2 horas se tomó la última lectura en el tope del menisco.

Las lecturas tomadas a los 40 segundos y a las 2 horas se corrigieron con la Ecuación número 13. Debido a que la temperatura del agua era mayor que 19,4°C.

$$L_c = L_h + (L_t - 19,4) * 0,3 \text{ (Ecuación 13)}$$

Donde:

- L_c = Lectura corregida
- L_h = Lectura del hidrómetro
- L_t = Lectura de la temperatura

Luego con la Ecuación 14 se calculó el porcentaje de masa de sólidos en suspensión.

$$\%M_{ssp} = L_c/p \text{ (Ecuación 14)}$$

Donde:

- $\%M_{ssp}$ = Porcentaje de masa de sólidos en suspensión
- L_c = Lectura corregida
- p = Peso de la muestra

Se procedió a tomar los porcentajes de arena, arcilla y limo para la muestra con las ecuaciones 15, 16 y 17.

$$\% \text{ Arena} = 100 - \% \text{ Mssp40} \text{ (Ecuación 15)}$$

Donde:

- $\% \text{ Arena}$ = Porcentaje de arena
- $\% \text{ Mssp40}$ = Porcentaje de masa de sólidos en suspensión a los 40 segundos

$$\% \text{ Arcilla} = (\text{Lc2h} / \text{P}) * 100 \text{ (Ecuación 16)}$$

Donde:

- $\% \text{ Arcilla}$ = Porcentaje de arcilla
- Lc2h = Lectura corregida a las 2 horas
- P = peso de la muestra

$$\% \text{ Limo} = 100 - (\% \text{ arena} + \% \text{ arcilla}) \text{ (Ecuación 17)}$$

Y finalmente, con la ayuda del triángulo de textura se determinó el tipo de suelo.

8.2 Anexos 2: Estudio del suelo

Cuadro 84. Textura del suelo en estudio.

Textura del suelo				
Tiempo	Lectura Hidrómetro	Temperatura (°C)	Lectura Hidrómetro corregida	Peso muestra (g)
40s	12	23	13,08	40
2h	4	24,5	5,53	
% Material en suspensión	32,7			
% arenas	67,3			
% arcillas	13,825			
%limos	18,875			
Textura	Franco arenoso			

Cuadro 85. Humedad gravimétrica y volumétrica del suelo en estudio.

Humedad gravimétrica y volumétrica del suelo	
Psh (g)	155,9
Pss (g)	119
HG (%)	31,01
Dap (g/cm3)	1,40
HV (%)	43,41

Cuadro 86. Capacidad de campo y punto de marchites permanente del suelo en estudio.

Capacidad de campo y punto de marchites permanente	
% arenas	67,30
% arcillas	13,83
%limos	18,88
CC	17,61
PMP	9,79

8.3 Anexo 3: Contenido relativo del agua

Cuadro 87. Contenido relativo de agua para tres plantas de chile Dulcético bajo ambiente protegido (4/4/2019)

	Planta 1		Planta 2		Planta 3	
	Ph (g)	Ps (g)	Ph (g)	Ps (g)	Ph (g)	Ps (g)
Raíz	31	8,5	30,6	9,2	42,4	13,1
Tallo	180,1	28,5	173,8	29,5	130,8	20,3
Hojas	144,2	24,4	153	24,4	103,1	17,3
Peso total h (g)	355,30		357,40		276,30	
Peso total s (g)	61,40		63,10		50,70	
Agua (g)	293,90		294,30		225,60	
HC raíz (%)	72,58		69,93		69,10	
HC tallo (%)	84,18		83,03		84,48	
HC hojas (%)	83,08		84,05		83,22	

Cuadro 88. Contenido relativo de agua para tres plantas de chile Dulcético bajo ambiente protegido (4/5/2019)

	Planta 4		Planta 5		Planta 6	
	Ph (g)	Ps (g)	Ph (g)	Ps (g)	Ph (g)	Ps (g)
Raíz	61,2	19,4	61,9	21,5	37,4	11,6
Tallo	352,3	75,3	337,9	78,6	268,4	48,9
Hojas	172,2	27,9	154,1	24,3	157,9	25,1
Peso total (g)	585,70		553,90		463,70	
Peso total s (g)	122,60		124,40		85,60	
Agua (g)	463,10		429,50		378,10	
HC raíz (%)	68,30		65,27		68,98	
HC tallo (%)	78,63		76,74		81,78	
HC hojas (%)	83,80		84,23		84,10	

8.4 Anexo 4: Anomalías en el invernadero



Figura 64. Primera anomalía del invernadero de la Escuela de Ingeniería Agrícola, Cartago



Figura 65. Segunda anomalía del invernadero de la Escuela de Ingeniería Agrícola, Cartago