

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“EFICIENCIA HÍDRICA, ENERGÉTICA Y EMISIONES CO2
UTILIZANDO SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO EN LAS
ÁREAS VERDES DE LA UNALM”**

Presentada por:

DAVID RICARDO ASCENCIOS TEMPLO

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
DOCTORIS PHILOSOPHIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

Lima – Perú

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS

**“EFICIENCIA HÍDRICA, ENERGÉTICA Y EMISIONES CO₂
UTILIZANDO SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO, EN
LAS ÁREAS VERDES DE LA UNALM”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE

Doctoris Philosophiae (PhD)

Presentada por:

DAVID RICARDO ASCENCIOS TEMPLO

Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva

PRESIDENTE

Dr Néstor Montalvo Arquíñigo

PATROCINADOR

Dr. Abel Mejía Marcacuzco

MIEMBRO

Ph.D. Eduardo Chávarri Velarde

MIEMBRO

~~Dr. Carlos Jesús Baca García~~
MIEMBRO EXTERNO

DEDICATORIA

**A MIS PADRES, FELIPE, JESÚS Y LIDIA POR SU APOYO INCONDICIONAL
PARA ALCANZAR MIS METAS.**

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, Esperanza, David y Diana por apoyarme, acompañarme y ayudarme durante el proceso.

A mi patrocinador Néstor Montalvo y a los jurados, por los consejos y correcciones para mejorar la tesis.

A mis buenos profesores por contribuir a mi formación académica.

A mis compañeros de trabajo del Departamento y Maestría de Recursos Hídricos, así como mis compañeros de las clases del Doctorado de Recursos Hídricos y amigos que trabajan en la UNALM, que lograron con su presencia y buen ánimo crear un ambiente agradable para el desarrollo del presente trabajo.

Finalmente agradezco al Departamento de Recursos Hídricos, Maestría de Recursos Hídricos, Unidad de Riego Tecnificado de la UNALM y al Vicerrectorado de Investigación por su apoyo en recursos humanos y económicos, materiales, equipos y campos demostrativos, para la culminación de la tesis.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 CÉSPED AMERICANO	4
2.2 CALIDAD VISUAL DEL CÉSPED.....	4
2.3 ÁRBOLES EN LA MOLINA	5
2.4 MÉTODO DE SELECCIÓN DE PLANTAS PARA LOS PAISAJES URBANOS	6
2.5 METABOLISMOS FOTOSINTÉTICOS DE LAS PLANTAS.....	6
2.6 REQUERIMIENTOS DE AGUA DEL PAISAJE (ETJ).....	7
2.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (ETC).....	9
2.8 COEFICIENTE DE ESTRÉS HÍDRICO (KS)	10
2.9 ESTACIONES AUTOMÁTICAS.....	10
2.10 HUMEDAD DEL SUELO	10
2.10.1 Reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR).....	10
2.10.2 Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR).....	11
2.11 BALANCE HÍDRICO EN EL SUELO.....	11
2.12 LISÍMETRO	12
2.13 EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (EUA).....	13
2.14 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (PAJ).....	13
2.15 DISTRIBUCIÓN DE UNIFORMIDAD (DU) Y EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE RIEGO (ER).....	15
2.16 SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADOS.....	21
2.16.1 Riego por aspersión	21
2.16.2 Riego por goteo subsuperficial (RGS).....	23
2.17 SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE LOS DIÁMETROS DE LA RED DE TUBERÍAS.....	24
2.18 BOMBAS, CURVAS DE LAS BOMBAS, LEYES DE AFINIDAD, VARIADOR DE FRECUENCIA.....	26
2.18.1 Binomio agua y energía.....	26

2.18.2	Curvas de las bombas	27
2.18.3	Demanda de energía en una instalación de riego.....	29
2.18.4	Eficiencia del grupo bomba y motor	31
2.18.5	Leyes de afinidad de las bombas	31
2.18.6	Variador de frecuencia.....	33
2.18.7	Regulación de caudal en bombas.....	34
2.19	AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS SISTEMAS DE RIEGO ...	38
2.20	HUELLA DE CARBONO Y EMISIÓN DE CO ₂	39
III.	METODOLOGÍA.....	41
3.1	LUGAR DE EXPERIMENTACIÓN	41
3.2	SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN Y GOTEO SUBSUPERFICIAL, EQUIPO Y MATERIALES	41
3.3	COEFICIENTE DE RIEGO DEL CÉSPED AMERICANO, UTILIZANDO RGS43	
3.3.1	Monitoreo de las variables meteorológicas	43
3.3.2	Monitoreo de la humedad del suelo y eficiencia del uso del agua	44
3.3.3	Tratamientos y diseño estadístico.....	44
3.3.4	Monitoreo del sistema de riego por goteo subterráneo.....	45
3.3.5	Proceso de análisis jerárquico (PAJ) y coeficientes de riego	45
3.4	COEFICIENTE DE RIEGO DEL CÉSPED AMERICANO, UTILIZANDO ASPERSIÓN.....	47
3.5	COEFICIENTE DEL CULTIVO (KC).....	47
3.5.1	Estación meteorológica automática Davis Pro Advantage	48
3.5.2	Sistema de riego de difusores	48
3.5.3	Sensores de humedad.....	48
3.5.4	Lisímetro.....	48
3.5.5	Variables del balance hídrico en el suelo y kc del césped.....	49
3.6	SELECCIÓN DE PLANTAS Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS SEGÚN SU USO	51
3.6.1	Identificación y coeficientes de especies de plantas (Ks).....	51
3.6.2	Selección de especies de plantas.....	52
3.6.3	Coefficiente del paisaje y requerimiento de agua actual.....	52
3.6.4	Zonificación de áreas verdes según el uso.....	53
3.6.6	Evaluación de la distribución de la uniformidad y eficiencia de riego.....	54

3.6.7	Escenarios de balances hídricos	55
3.7	EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EMISIONES PRODUCIDAS DE CO ₂ EN LOS SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADOS.....	55
3.7.1	Operación del sistema.....	56
3.7.2	Cálculo de la eficiencia energética y emisiones de CO ₂ , situación actual.....	56
3.7.3	Cálculo de la eficiencia energética y emisiones de CO ₂ , situación mejorada	57
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
4.1	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA.....	59
4.1.1	Descripción de los sistemas de riego	59
4.1.2	Variables climáticas y evapotranspiración potencial.....	65
4.1.3	Características del suelo y agua en área experimental de riego por goteo	78
4.2	COEFICIENTE DE RIEGO DEL CÉSPED AMERICANO, UTILIZANDO RGS78	
4.2.1	Tratamientos, láminas de agua y monitoreo del sistema RGS	78
4.2.2	Monitoreo de humedad y eficiencia del uso de agua.....	80
4.2.3	La evaluación cualitativa del césped	83
4.2.4	Proceso de análisis jerárquico y selección de coeficientes de riego.....	86
4.2.5	Coefficiente de riego del césped americano, utilizando aspersión	87
4.3	COEFICIENTE DEL CULTIVO (KC) PARA EL CÉSPED AMERICANO	90
4.3.1	Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o).....	90
4.3.2	Riego.....	91
4.3.3	Precipitación	92
4.3.4	Drenaje.....	92
4.3.5	Variación de humedad en el suelo	92
4.3.6	Balance hídrico en el suelo y evapotranspiración del cultivo.....	93
4.3.7	Coefficiente de cultivo (kc), césped americano	93
4.4	SELECCIÓN Y ZONIFICACIÓN DE ÁREAS CON PLANTAS DE BAJO REQUERIMIENTO HÍDRICO.....	97
4.4.1	Identificación y coeficientes de especies de plantas.....	97
4.4.2	Demanda de las áreas verdes actual, considerando el coeficiente de jardín (KJ)..	101
4.4.3	Selección de especies de plantas de bajo requerimiento hídrico	104
4.4.4	Zonificación de áreas verdes según el uso.....	107
4.4.5	Evaluación hidráulica de las subunidades de riego por aspersión.....	115
4.4.6	Evaluación hidráulica de las subunidades de riego por goteo	117

4.4.7	Coeficiente de uniformidad y eficiencia de aplicación.....	119
4.4.8	Escenarios de balance hídrico.....	125
4.5	EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EMISIÓN DE CO ₂	133
4.5.1	Operación del sistema de riego.....	133
4.5.2	Sistema de bombeo sin variadores de frecuencia, $K_j = 1$ y emisión de CO ₂	137
4.5.3	Sistema de bombeo utilizando variador de frecuencia, $K_j = 0.8$ del césped, $K_j = 0.4$ del cubre suelos y emisión de CO ₂	141
V.	CONCLUSIONES.....	146
VI.	RECOMENDACIONES.....	149
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	150

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Factor especie (ks).....	8
Cuadro 2: Factor densidad (Kd).....	9
Cuadro 3: Factor microclima (Kmc).....	9
Cuadro 4: Leyes de afinidad.....	32
Cuadro 5: Promedios mensuales de la evapotranspiración potencial y las variables climáticas.....	73
Cuadro 6: Láminas aplicadas acumuladas a nivel mensual para los tratamientos (mm)	79
Cuadro 7: Porcentaje de humedad disponible (p) utilizado por tratamiento	82
Cuadro 8: Eficiencia del uso del agua del césped.....	83
Cuadro 9: Valoración de calidad del césped por estación.....	84
Cuadro 10: Coeficientes de prioridad (%) y riego seleccionados, utilizando el Proceso Análisis Jerárquico (PAJ)	87
Cuadro 11: Coeficientes de riego, año 2016 -2017.....	89
Cuadro 12: Variables del balance hídrico y coeficiente del cultivo.....	90
Cuadro 13: Coeficientes del césped americano estacional.....	94
Cuadro 14: Ahorro de agua utilizando los coeficientes del cultivo.....	97
Cuadro 15: Evapotranspiración potencial (pulgadas/día) del estado de California. Fuente: Costello <i>et al.</i> (2000)	98
Cuadro 16: Especies de árboles con sistema de riego.....	100
Cuadro 17: Especies de palmeras.....	101
Cuadro 18: Especies de césped.....	101
Cuadro 19: Demanda de agua considerando el coeficiente de jardín (KJ).....	103
Cuadro 20: Especies de árboles seleccionados.....	104
Cuadro 21: Especies de cubre suelos.....	105
Cuadro 22: Clasificación de especies de cubre suelos.....	106
Cuadro 23: Especies de césped.....	106
Cuadro 24: Especies de césped.....	107
Cuadro 25: Tipos de usos.....	108
Cuadro 26: Áreas de uso paisajista, descanso, deportivo y productivo.....	109
Cuadro 27: Áreas de uso paisajista.....	110

Cuadro 28: Áreas de uso deportivo y descanso.....	110
Cuadro 29: Características de los emisores.	115
Cuadro 30: Opciones de riego por goteo subterráneo.	118
Cuadro 31: Clasificación de sistemas de riego por aspersión, en base al DU.....	120
Cuadro 32: DU bajo diferentes condiciones de viento, emisor y forma de las subunidades.	120
Cuadro 33: Escenarios de eficiencia de riego.....	121
Cuadro 34: Variación de la eficiencia de riego durante el periodo agosto 2016 - julio 2017.	124
Cuadro 35: Demanda de agua para diferentes escenarios.	131
Cuadro 36: Balance hídrico para diferentes escenarios.....	132
Cuadro 37: Controlador ESP_LXD, turnos, válvulas y caudales.....	135
Cuadro 38: Controlador ESP_LXME, turnos, válvulas y caudales.....	137
Cuadro 39: Eficiencia energética y emisión de CO ₂ , utilizando bomba de 1750 rpm, situación actual.	140
Cuadro 40: Eficiencia energética y emisión de CO ₂ utilizando variadores de frecuencia.	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Jardines frente a la biblioteca y FIA.	4
Figura 2. a) Molle, b) Palmera, c) Olivo y d) Eucaliptos	5
Figura 3. Estación meteorológica automática.....	10
Figura 4. Balance de agua en el suelo de la zona radicular.	11
Figura 5. Modelo de lisímetro de drenaje.....	13
Figura 6. Estructura de jerarquía.	14
Figura 7. Diagrama de flujo del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ)	14
Figura 8. Distribución normal de la calidad de fabricación del caudal del emisor.	16
Figura 9. Diagrama de presiones de la subunidad de riego.	17
Figura 10. Gotero auto compensado Katif,.....	18
Figura 11. Relación de la presión y caudal para emisores de flujo turbulento.....	19
Figura 12. Riego uniforme y no uniforme.....	19
Figura 13. Riego uniforme y eficiente.....	21
Figura 14. Difusores.. ..	22
Figura 15. Radios, caudales y presiones de los rotores.. ..	23
Figura 16. Riego por goteo subsuperficial.....	24
Figura 17. Selección técnica económica de tuberías.	26
Figura 18. Curvas de las bombas.....	28
Figura 19. Punto de operación de la bomba: 1 punto de trabajo con pobre eficiencia, 2 punto de trabajo con buena eficiencia.	29
Figura 20. Potencias del sistema de bombeo.....	29
Figura 21 a) Esquema de funcionamiento de una impulsión con regulación de caudal por medio de válvula de compuerta. b) Curvas características y punto de funcionamiento de la instalación.. ..	30
Figura 22. Leyes de afinidad	32
Figura 23. Principios de funcionamiento de un variador de frecuencia.	34
Figura 24. Ajuste del caudal por estrangulamiento con válvula en serie.	35
Figura 25. Ajuste del caudal por estrangulamiento con válvula en paralelo.	36
Figura 26. Ajuste del caudal utilizando variadores de velocidad.	37

Figura 27. Motor con variador de frecuencia, Laboratorio de Recursos Hidricos. UNALM.	37
Figura 28. Área de proyecto, UNALM.	42
Figura 29 Lisímetro de drenaje. Fuente : (Padilla Soldevilla 2016).....	49
Figura 30. Unidad de bombeo y reservorio.	60
Figura 31. Cabezal de control.....	61
Figura 32. Casetas y reservorio, fotos tomadas desde un dron.	61
Figura 33. Automatización y telecontrol Plataforma IQ Cloud Rain Bird.....	62
Figura 34. Red de tuberías y válvulas.....	63
Figura 35. Sistema de riego por goteo subterráneo.	64
Figura 36. a) Sistema de riego por goteo subterráneo y tratamientos b) Estación automática Davis c) Ollas y platos de presión d) Sensor FDR e) Sensor TDR.	67
Figura 37. Evapotranspiración potencial mensual y diaria.....	68
Figura 38. Radiación solar diaria.....	69
Figura 39. Temperatura diaria.	70
Figura 40. Humedad relativa diaria.	71
Figura 41. Velocidad del viento diario.	72
Figura 42. Variación horaria de la evapotranspiración potencial mensual.....	74
Figura 43. Variación horaria de la radiación solar.	76
Figura 44. Variación horaria de la temperatura.	76
Figura 45. Variación horaria de la humedad relativa.	76
Figura 46. Variación horaria de la velocidad del viento.....	77
Figura 47. a) Excavación de laterales enterrados b) Inspección de los goteros enterrados del tratamiento 0,4 ETo, no presenta invasión de raíces.	80
Figura 48. Curva de retención de humedad del suelo.....	81
Figura 49. Agua disponible para la planta, mes de febrero.	81
Figura 50. Agua disponible para la planta, mes de agosto.	82
Figura 51. Imágenes digitales de porcentajes de cobertura verde de los tratamientos a) Verano b) Invierno.	85
Figura 52. Variación mensual de la Eto y Etc.	91
Figura 53. Relación entre volumen calculado y volúmenes aplicados.....	92
Figura 54. Curvas de calibración de centibares y contenido de humedad en milímetros....	93
Figura 55. Coeficientes mensuales del césped americano.....	94

Figura 56. Variables monitoreadas en el balance hídrico.....	96
Figura 57. Evapotranspiración potencial de las seis regiones de California y la UNALM.	98
Figura 58. Tipos de uso: Paisajista (PA), deportivo (Dep), paisajista -descanso (Pa, De), paisajista, descanso y productivo (Pa, De, Pr) y paisajista-productivo (Pa,Pr).....	111
Figura 59. Tipos de coberturas.	112
Figura 60. Coeficientes de jardín (Kj).....	113
Figura 61. Turnos de riego	114
Figura 62. Subunidad 33, riego de los jardines de la Escuela de Posgrado.....	116
Figura 63. Presiones y velocidades de la subunidad 33, utilizando rotores.	117
Figura 64. Sistema de riego por aspersión y goteo subterráneo.	118
Figura 65. Diagrama de pérdidas de carga de la subunidad 33, utilizando RGS.	119
Figura 66. Bocatoma rustica, sector Vitarte.	123
Figura 67. a) Riego por gravedad, inundación y b) Riego por aspersión.	127
Figura 68. Puntos de operación de la bomba, curvas de altura dinámica total, potencia y eficiencia de la bomba.	139
Figura 69. Curvas de la ADT, potencias y eficiencia de la bomba con variadores de velocidades.	144

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Evapotranspiración potencial y variables climáticas	159
Anexo 2: Método de análisis jerárquico (MAJ)	165
Anexo 3: Zonas de evapotranspiración potencial de California (USA)	172
Anexo 4: Selección de emisor y especificaciones técnicas de los emisores	176
Anexo 5: Demandas y balance hídrico de los escenarios	179
Anexo 6: Controladores y electroválvulas.....	184
Anexo 7: Curva de la bomba, placas de motor, placa de la bomba y familias de ADT & Q y ADT & Kw para diferentes velocidades de la bomba.....	187
Anexo 8: Resumen del artículo científico publicado.....	190

RESUMEN

El agua y la energía son recursos finitos y escasos, por lo que es necesario reducir sus consumos y usarlos eficientemente en los sistemas de riego. El objetivo del estudio fue determinar la eficiencia hídrica, energética y la emisión del CO₂, en las áreas verdes urbanas de la UNALM, utilizando sistemas de riego presurizado. Se evaluó el estrés hídrico en el césped americano, considerando un gradiente de la evapotranspiración potencial y el efecto sobre la calidad del césped. Se utilizó riego por goteo subterráneo de agosto 2016 a julio 2017. Se obtuvieron los coeficientes del cultivo en condiciones óptimas para el césped americano, mediante lisímetros de drenaje. Se evaluaron las eficiencias de riego de los sistemas de riego presurizados, la eficiencia energética del sistema de bombeo, con velocidad constante y variable utilizando variadores de frecuencia y la emisión de CO₂, producida por los sistemas de riego presurizados. Los resultados mostraron coeficientes de riego para el goteo subterráneo de: 0.8 ETo; 0.8 ETo; 0.4 ETo y 0.6 ETo, para el verano, otoño, invierno y primavera respectivamente. Los coeficientes de riego, para el riego por aspersión, fueron de 0.75 para verano y 0.6 para las otras estaciones. Los coeficientes de cultivo para el césped americano fueron: 0.95, 0.85, 0.52 y 0.78, para el verano, otoño, invierno y primavera respectivamente. La eficiencia para el riego utilizando rotores fue de 75 %, con difusores fue de 60% y con goteo subterráneo fue superior al 90%. Para el actual sistema de riego por aspersión, se obtuvo una eficiencia energética total de 70.30 %, con una electrobomba de velocidad constante. En una situación mejorada, con la electrobomba con velocidad variable, se obtendría una eficiencia energética total de 68.75 %, y decrecerían las emisiones en 20.97 toneladas de CO₂/año.

Palabras claves: Gradiente de ETo, lisímetro, distribución de uniformidad, coeficiente de jardín, variadores de frecuencia.

ABSTRACT

Water and energy are finite and scarce resources, consequently, it is necessary to reduce their consumption and use it efficiently in irrigation systems. The aim of the study was to determine the water and energy efficiency, as well as the emission of CO₂ in the urban green areas of UNALM, using pressurized irrigation systems. The water stress in St. Augustine grass (*Stenotaphrum secundatum*) was evaluated, considering a gradient of the potential evapotranspiration and the effect on the grass quality. In addition, subsurface drip irrigation was used from August 2016 to July 2017. Crop coefficients were obtained in optimal conditions for St. Augustine grass, using drainage lysimeters. Moreover, the irrigation efficiencies of the pressurized irrigation systems and the energy efficiency of the pumping system were evaluated, with constant and variable speed using variable frequency drives and the CO₂ emission produced by the pressurized irrigation systems was determined. The results showed irrigation coefficients for the subsurface drip irrigation of 0.8 ETo; 0.8 ETo; 0.4 ETo and 0.6 ETo, for summer, autumn, winter, and spring respectively. Irrigation coefficients for sprinkler irrigation were 0.75 for summer and 0.6 for the other seasons. The crop coefficients for St. Augustine grass were: 0.95, 0.85, 0.52, and 0.78, for the summer, autumn, winter, and spring, respectively. The irrigation efficiency using rotors was 75%, with diffusers it was 60% and with subsurface drip, it was higher than 90%. For the current sprinkler irrigation system, the total efficiency energy of 70.30% was obtained, with a constant speed in the electric motor. In an improved situation, with the variable frequency drives in the electric motor, the total efficiency energy of 68.75% would be obtained, and emissions would decrease by 20.97 tons of CO₂/year.

Keywords: ETo gradient, lysimeter, distribution uniformity, landscape coefficient, variable frequency drives.

I. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua es el principal factor limitante en la producción agrícola y el mantenimiento y/o incremento de las áreas verdes urbanas, limitación que crece debido al cambio climático y la competencia entre los diferentes sectores usuarios; en este sentido, los aspectos que deben considerarse en la planificación e instalación de áreas verdes urbanas en Lima metropolitana son los siguientes: Selección de plantas de bajo requerimiento hídrico, resistentes a la sequía y estrés hídrico, propias o adaptadas al medio árido, especies y variedades de mayor eficiencia del uso del agua (EUA), aplicación de calendarios y dosis de riego orientados a incrementar la EUA como el riego deficitario controlado y plantas estéticamente aceptados por los usuarios (Taylor *et al.* 2006).

La escasez del agua y la energía, son reconocidos como problemas en la agricultura. El agua y la energía son los recursos de entrada en los sistemas de producción agraria; el uso eficiente de estos recursos es vital para la productividad y la competitividad en la agricultura, así como para la sustentabilidad ambiental (Ahmad y Khan 2017).

Lima es la segunda ciudad más grande del mundo desarrollada en un desierto, cuenta con el río Rímac que tiene un caudal promedio de 26.6 m³/s y el 80% del agua potable de Lima Metropolitana y Callao proviene de la cuenca del río Rímac (Aquafondo 2015), parte de esta fuente es utilizada para el riego de las áreas verdes urbanas.

Lima tiene una tasa de crecimiento de 1,57 %, una población aproximada de 9, 886, 647 habitantes, tiene 3,500 hectáreas de áreas verdes urbanas públicas (Eisenberg *et al.* 2014), con un ratio de 3.5 m²/hab; este indicador es producto de la urbanización no planificada, precaria y explosiva, a partir de la segunda mitad del siglo XX, esta situación se agrava por la escasez de agua, la baja eficiencia de riego y el precio de la energía que son factores limitantes para el incremento y mantenimiento de las áreas verdes urbanas, limitación que

crece debido al cambio climático y la competencia entre los diferentes sectores usuarios del agua.

La población sigue creciendo en las ciudades, las cuales dependen de la naturaleza para su supervivencia; es decir, de los ecosistemas fuera de los límites de la ciudad, pero también de los ecosistemas dentro de ella, como son las áreas verdes urbanas, las cuales nos brindan servicios eco sistémicos (Bolund y Hunhammar 1999).

El césped americano (*Stenotaphrum secundatum*) es la planta que ocupa el 80 % de las áreas verdes de Lima metropolitana; se asume para el césped un coeficiente del cultivo (Kc) de la unidad, que genera una sobreestimación del requerimiento de agua; en tal sentido es necesario determinar sus valores de coeficiente de cultivo a condiciones óptimas de humedad y bajo estrés utilizando el riego deficitario controlado, para las estaciones del año, que permita un ahorro y mejora de la gestión del agua a los municipios, instituciones públicas, privadas y jardines urbanos.

La relación entre la transpiración y la apariencia visual del césped puede ser más crítica en el futuro, debido a las restricciones de agua; sin embargo, el césped es capaz de limitar su transpiración debido a las condiciones secas en el suelo, presentando una apariencia adecuada durante su crecimiento (Cathey *et al.* 2013).

Existe la necesidad de crear bases científicas para realizar acciones que contribuyan a la mitigación y adaptación al cambio climático, realizando el uso eficiente del agua y utilizando sistemas de riego presurizados que permitan obtener altas uniformidades y eficiencias de riego. Se requiere evaluar el efecto del estrés hídrico en el césped a diferentes niveles de humedad en el suelo y predecir su afectación sobre la calidad del césped.

Como medidas de adaptación y mitigación al cambio climático, es necesario realizar la selección adecuada de plantas y aplicar en forma uniforme el agua, utilizando sistemas de riego presurizado; diseñados, operados y mantenidos adecuadamente para realizar el uso eficiente de agua y energía, que a su vez permita minimizar la emisión de dióxido de carbono (CO₂).

Los resultados obtenidos con la adopción de las medidas antes señaladas tendrán como beneficiarios la sociedad en general, específicamente a las municipalidades de los distritos de Lima, así como a aquellas personas o empresas particulares que cuenten con áreas verdes dentro de sus propiedades, porque contarán con los conocimientos para gestionar mejor el agua y energía.

Objetivo principal

Determinar la eficiencia hídrica, energética y la emisión de CO₂ en las áreas verdes urbanas de la UNALM, utilizando sistemas de riego presurizado.

Objetivos específicos

- Obtener los coeficientes de riego y el uso eficiente del agua que permita un adecuado desarrollo del césped americano (*Stenotaphrum secundatum*), utilizando el riego por goteo subterráneo y aspersión, que permitirá el ahorro de agua y una calidad visual adecuada.
- Obtener los coeficientes de cultivo para el césped americano (*Stenotaphrum secundatum*) utilizando lisímetros de drenaje para las diferentes estaciones y meses del año.
- Seleccionar y zonificar las áreas de plantas de bajo requerimiento hídrico, limitando áreas con césped y evaluar la eficiencia hídrica.
- Evaluar la eficiencia energética y producción de CO₂.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 CÉSPED AMERICANO

Stenotaphrum secundatum es una especie de césped, que se establece en terrenos poco preparados de diferentes texturas. Se propaga por estolones, es oriunda de América del Norte, las Indias occidentales y Australia. Es invasiva, resistente a altas temperaturas, tolera cortos periodos sin agua, se desarrolla en climas cálido y es resistente a las bajas temperaturas. Tiene la característica de tolerar la sombra moderada. Crece normalmente entre el pH entre 6 y 8.5. Resiste la salinidad del suelo hasta niveles de salinidad cercanos a 15 mmhos/cm. Es sembrado en las áreas verdes urbanas como parques públicos y jardines, son utilizados con fines de uso paisajista y/o utilitario, es decir cubren los requerimientos estéticos o paisajísticos, además de soportar el pisoteo, sombra y estrés por falta de agua (Cifuentes Meza 2016).

2.2 CALIDAD VISUAL DEL CÉSPED

Los siguientes factores determinan la calidad visual del césped : El color, la uniformidad, la densidad, la textura, la cobertura y la altura (Monje Jiménez 2006) (Figura 1).



Figura 1: Jardines frente a la biblioteca y FIA.

2.3 ÁRBOLES EN EL DISTRITO DE LA MOLINA

Los árboles brindan los siguientes servicios ambientales: Regula el clima, la calidad de aire, atenúa los ruidos, deposición y dispersión de partículas del aire, captura de carbono, regulación de la temperatura, provisión de agua en calidad y cantidad, generación de oxígeno, amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales, protección y recuperación de suelos, biodiversidad, paisaje y recreación.

Entre los árboles que se encuentran en el distrito de la Molina, podemos citar a la tipa, ficus, molle serrano, huarango, acacia de seda, árbol de la orquídea, tara, casuarina, cedro colorado, ponciana real, eucalipto, jacaranda, palmeras, magnolia, olivo y tecomá entre otros (Figura 2).



Figura 2: a) Molle, b) Palmera, c) Olivo y d) Eucaliptos.

2.4 MÉTODO DE SELECCIÓN DE PLANTAS PARA LOS PAISAJES URBANOS

La selección de plantas adecuadas al clima, función, disponibilidad y requerimiento de agua es importante para desarrollar las áreas verdes urbanas para ser sostenibles. Se desarrolló una metodología para ayudar a los arquitectos paisajistas, diseñadores, y horticultores urbanos en el proceso de selección de plantas. El caso se desarrolló en la ciudad de Teherán, que tiene un clima árido y semiárido, el cual plantea más desafíos para los expertos. El método denominado proceso analítico jerárquico (PAJ) se ha utilizado para encontrar las especies de plantas que mejor se adaptasen a una zona, considerando parámetros de selección como la tolerancia a la escasez de agua, bajo requerimiento de agua, las condiciones urbanas, la estética, el costo de mantenimiento y las características de crecimiento entre otras. Nuevas plantas fueron seleccionadas utilizando el PAJ para el paisaje urbano de Teherán, que tiene un gran potencial para ser más atractivo, de bajo costo, disminución de alergias y de bajo requerimiento hídrico (Asgarzadeh *et al.* 2014).

2.5 METABOLISMOS FOTOSINTÉTICOS DE LAS PLANTAS

La apertura de las estomas para la fijación del CO₂ en la fotosíntesis implica una pérdida de agua, siendo un problema en ambientes áridos. Las plantas han desarrollado adaptaciones metabólicas y anatómicas que permiten mejorar la eficiencia del uso del agua y es común en plantas de metabolismo fotosintético C₃.

La planta fija CO₂ realizando el Ciclo de Calvin, catalizado por la enzima rubisco. Existe un proceso respiratorio no mitocondrial que consume O₂ y produce CO₂ estimulado por la luz, conocido como fotorrespiración. Es importante en las plantas C₃, porque disminuye la capacidad fotosintética, la velocidad de la fotosíntesis neta decae al fijarse menos carbono con el mismo gasto de agua y para compensar la pérdida de CO₂ se tiende a una mayor apertura estomática, produciendo una menor eficiencia del uso del agua (Ehleringer y Cerling 2002). Las plantas C₃ son aproximadamente el 85 %, por ejemplo, el arroz, trigo y árboles.

Plantas de metabolismo fotosintético C₄, como adaptación a ambientes más cálidos y secos, surgen nuevos metabolismos. El CO₂ llega a las células del mesófilo, y se fija por la enzima fosfoenolpiruvato (PEP) que tiene más afinidad por el CO₂ que la enzima rubisco. Este CO₂ se convierte en malato y aspartato que pasarán a las células de la vaina, donde se

transformarán en CO₂, que sigue el Ciclo de Calvin. La fotorrespiración es inexistente o muy pequeña en estas plantas porque la alta concentración de CO₂ en las células de la vaina impide la fotorrespiración. Esta variante del proceso de fijación confiere una mayor eficiencia en el uso del agua, puesto que se fija más carbono por molécula de agua.

Las plantas C₄ tienen mayor gasto energético porque requieren la producción de una enzima extra PEP, pero lo compensan con una mayor eficiencia del uso del agua, mayor crecimiento y eficacia en la fotosíntesis a temperaturas altas (Ehleringer y Cerling 2002). Ejemplos de plantas son la caña de azúcar y maíz.

Plantas de metabolismo fotosintético CAM, el metabolismo CAM (crassulacean acid metabolism) difiere del C₄ en que los procesos fotosintéticos muestran una separación temporal en vez de física. Constan de una fase en la que las estomas se abren durante la noche entrando CO₂ y saliendo agua. El CO₂ será transformado en malato por la enzima PEP. En la fase diurna, encontramos las estomas cerrados y la reserva de malato producida por la noche se transforma en CO₂ que permite el inicio del Ciclo de Calvin.

Las plantas CAM al dividir el metabolismo en noche y día, reducen las pérdidas de agua. El flujo de salida de agua es en función de la humedad exterior. Por el día, cuando más seco está el aire, hay menor humedad relativa, mayor será la difusión de agua por transpiración. Por este motivo las estomas se mantienen cerrados y solo se abren por la noche, cuando la humedad es mayor. Esta es también otra variante del proceso de fijación de CO₂, en el que se mantiene una mayor eficiencia del uso del agua, pero conlleva una menor productividad que afecta al crecimiento (Sage 2014). Predominan en zonas cálidas y secas como en los desiertos.

2.6 REQUERIMIENTOS DE AGUA DEL PAISAJE (ETJ)

La estrategia para incrementar la eficiencia del agua es conocer las necesidades de agua de las plantas, para regar la cantidad necesaria y mantener los paisajes saludables y con la adecuada calidad visual.

Para la estimación de las necesidades de agua de las plantas de un paisaje, se utiliza la metodología desarrollada en la Universidad de California llamado WUCOLS que es el anacrónico de *Water Use Classifications of Landscape Species*.

La fórmula ETJ se presenta:

$$ETJ = ETo * Kj$$

ETj = Evapotranspiración de jardín.

Kj = Coeficiente de jardín

Kj = Estima el requerimiento de agua de las plantas del paisaje, para mantener la estética, considerando la especie, la densidad de vegetación y el microclima (Costello *et al.* 2000).

Ecuación del coeficiente de jardín (Kj) se presenta a continuación:

$$Kj = Ks * Kd * Kmc$$

Ks = factor especie

Kd = factor densidad

Kmc = factor microclima

El Ks, se utiliza para determinar los requerimientos hídricos de cada especie. El Ks tiene un valor constante, es decir no depende del estado fenológico de la planta, mientras que los valores de coeficiente de cultivo (Kc) si reflejan esta variación en las plantas (Costello *et al.* 2000). En la Cuadro 1, se presentan el factor especie.

Cuadro 1: Factor especie.

Categoría	Rango ks
Muy bajo consumo de agua	< 0.1
Bajo consumo de agua	0.1 – 0.3
Moderado consumo de agua	0.4 – 0.6
Alto consumo de agua	0.7 – 0.9

Fuente: Costello *et al.* (2000)

El Kd, expresa las diferencias en la densidad de la vegetación entre las plantaciones del área verde o jardín. La densidad de la vegetación se utiliza para referirse a la superficie foliar colectiva de todas las plantas del área verde. Las diferencias en la densidad de la vegetación o de área foliar, requieren diferentes requerimientos de agua (Costello *et al.* 2000). En el Cuadro 2, se presentan el factor de densidad.

Cuadro 2: Factor densidad.

Categoría	Rango	Descripción
Bajo	0.5 – 0.9	Plantaciones en crecimiento (inmaduras) o plantaciones que no llega a cubrir toda el área.
Medio	1.0	Determinada por una plantación predominante (tapizantes) y arboles con una cubierta de copas del 70% al 100%.
Alto	1.1 – 1.3	Presentan los tres tipos de vegetación (árboles, arbustos y cubre suelos) y se encuentran en cantidades sustanciales.

Fuente: Costello *et al.* (2000)

La presencia de microclimas en las áreas verdes se debe tenerse en cuenta en las estimaciones de los requerimientos de agua de la planta. Los paisajes urbanos presentan edificios y pavimentos, que influyen en la temperatura, la velocidad del viento, intensidad de la luz y la humedad, estas variables varían considerablemente entre los paisajes, presentando diferentes microclimas (Costello *et al.* 2000). En la Cuadro 3, el factor microclima.

Cuadro 3: Factor microclima.

Categoría	Rango	Descripción
Bajo	0.5 – 0.9	Los sitios que están a la sombra o protegidos de los vientos típicos de la zona.
Medio	1.0	Equivalente a un entorno de campo abierto y sin vientos extraordinarios o atípicos.
Alto	1.1 – 1.4	Plantaciones expuestas a vientos atípicos, ubicadas en medio de autopistas o estacionamientos sin sombra, que reciban luz reflejada desde ventanas cercanas, automóviles u otras superficies reflectantes.

Fuente: Costello *et al.* (2000)

2.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (ETC)

Es la evapotranspiración de un cultivo que no presenta enfermedades, con una adecuada fertilización y que se desarrolla en amplias parcelas, bajo condiciones óptimas de suelo y agua, que le permite obtener la máxima producción por las condiciones climáticas de su medio circundante (Allen *et al.* 2006). ETC es el producto de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y de coeficiente del cultivo (K_c).

2.8 COEFICIENTE DE ESTRÉS HÍDRICO (KS)

Los efectos del estrés hídrico sobre la ETc del cultivo se reflejan mediante la reducción del valor del coeficiente del cultivo, afectados por el coeficiente de estrés hídrico (Ks). Este es un factor adimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo y describe el efecto de la reducción hídrica en la planta (Allen *et al.* 2006). Además, para conocer la reducción relativa de la productividad en función de la reducción de la evapotranspiración del cultivo generada por falta de agua, se utiliza el factor de respuesta de la productividad (Díaz *et al.* 2012).

2.9 ESTACIONES AUTOMÁTICAS

Las estaciones meteorológicas automáticas tienen un anemómetro para medir la velocidad y dirección del viento, un colector de lluvia, así como sensores de temperatura, radiación solar, humedad, entre otros. Las diferentes variables climatológicas son registradas y procesadas para el cálculo de la evapotranspiración potencial, empleando la ecuación Penman – Monteith (Figura 3).



Figura 3: Estación meteorológica automática.

Fuente: Davis instrumens (2002)

2.10 HUMEDAD DEL SUELO

2.10.1 Reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR)

Los sensores de humedad que utilizan la FDR miden el contenido volumétrico de agua, de forma indirecta a través de la constante dieléctrica aparente del suelo, mediante la medición del tiempo que tarda en cargarse un condensador, que utiliza el suelo como dieléctrico, son llamados también sensores capacitivos. Las frecuencias que utilizan están entre 10 y 100 MHz, lo que hace que las medidas sean rápidas y menos costosas que los

sensores de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) (Buesa Pueyo 2013). El funcionamiento de los sensores FDR se basa en el empleo un campo electromagnético para medir la permitividad dieléctrica del medio que los rodea. El sensor suministra una onda oscilante de 70 MHz (está frecuencia minimiza los efectos de la salinidad y de textura) hacia las puntas que cargan al dieléctrico del material, el diseño de estas puntas se puede notar en la carga almacenada es proporcional al sustrato dieléctrico y al contenido volumétrico de agua del sustrato.

2.10.2 Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)

Los sensores de humedad que utilizan la TDR miden el tiempo que tarda un pulso electromagnético (1 MHz- 1 GHz) en pasar de un electrodo a otro a través del suelo, que depende de la constante dieléctrica del suelo. Existen muchos métodos que se han desarrollado, aquellos que utilizan la reflectometría tienen muchas ventajas, como las siguientes: a) una alta precisión; b) carencia de peligros presentes con otros métodos asociados a radiación; c) excelente resolución espacial y temporal; d) mediciones simples de obtener, con la posibilidad de automatización; y e) requisitos mínimos de calibración bajo ciertas circunstancias. Sin embargo, esta tecnología presenta ciertos inconvenientes en la estimación en suelos orgánicos, volcánicos y de textura fina; requiriendo la calibración mediante la medición del contenido de humedad en los suelos mencionados, utilizando el método gravimétrico y los sensores TDR (Quichimbo *et al.* 2016).

2.11 BALANCE HÍDRICO EN EL SUELO

Es un volumen de control se evalúa los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo (Figura 4).

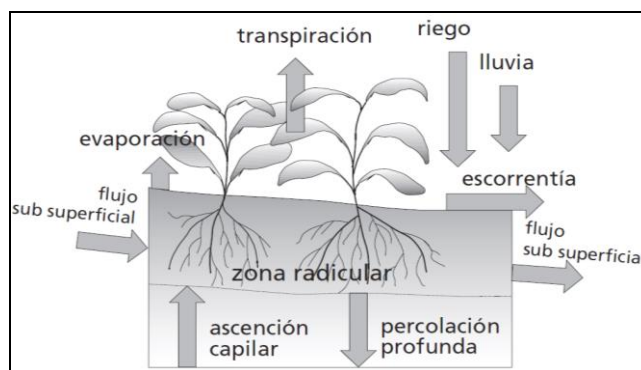


Figura 4: Balance de agua en el suelo de la zona radicular.

Fuente: Allen *et al.* (2006)

El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular (ΔFS). Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FSin y FSout son mínimos y no se toman en cuenta. La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Todos los flujos pueden ser cuantificados, a excepción de la evapotranspiración (ET), y puede ser obtenida a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔSW) para un periodo de tiempo:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW$$

El flujo sub-superficial, la percolación profunda y la capilaridad desde la capa freática son difíciles de medir y pueden no considerarse en periodos cortos de tiempo (Allen *et al.* 2006), la ecuación de balance hídrico en el suelo se simplifica como la siguiente:

$$ET = R + P - D - \Delta SW$$

2.12 LISÍMETRO

Es un volumen de control que contienen suelo, que está aislado hidrológicamente del suelo circundante, para su control y medición los diferentes variables que son componentes del balance hídrico del suelo (Puppo y García Petillo 2010).

Los lisímetros de drenaje recolectan el agua del suelo que se percola naturalmente hacia abajo por los suelos, por efecto de la gravedad, tienen mallas y gravas para retener el suelo y filtrar el agua, tiene una salida en el fondo de manera que el agua percolada es depositada en un recipiente, para ser cuantificada y también puede ser extraída con una bomba de vacío (Figura 5).



Figura 5: Modelo de lisímetro de drenaje.

2.13 EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (EUA)

Es la relación entre la biomasa en un determinado momento de un cultivo por unidad de agua utilizada que emplea el referido cultivo. La EUA puede ser medida a nivel de hoja, cultivo o ecosistema, cada nivel presenta particularidades a ser consideradas en la medición e interpretación de los resultados (Medrano *et al.* 2008). Los cultivos que presentan mayores valores de EUA son más ventajosos para la agricultura, sin embargo, para las plantas de uso paisajista es más importante otras características como por ejemplo la calidad visual y la baja EUA para distanciar los cortes como es el caso del césped.

2.14 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (PAJ)

La toma de decisiones multicriterio es un problema crítico de la vida real. Cualquier actividad involucra la evaluación de un conjunto de alternativas en función de un conjunto de criterios de decisión, donde normalmente estos criterios están en conflicto unos con otros (Gómez, J ; Cabrera 2008). Las múltiples decisiones que los hombres y mujeres están expuestos, la cantidad de información y la falta de dominio de las áreas del conocimiento, impulsaron la creación de una metodología capaz de condensar situaciones de orden cuantitativo y cualitativo en una formulación matemática, con resultados numéricos que simplifican la realidad y hacen factible una lectura numérica del problema y la solución (Saaty 2008). La Figura 6, presenta el esquema de modelo jerárquico, compuesto por un objetivo, criterios y un conjunto de alternativas.

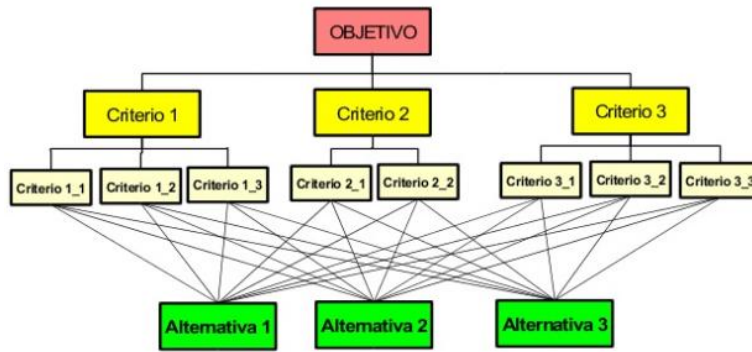


Figura 6: Estructura de jerarquía.

Fuente : Saaty (2008)

Los pasos para el desarrollo del proceso de análisis jerárquico se presentan en la Figura 7.

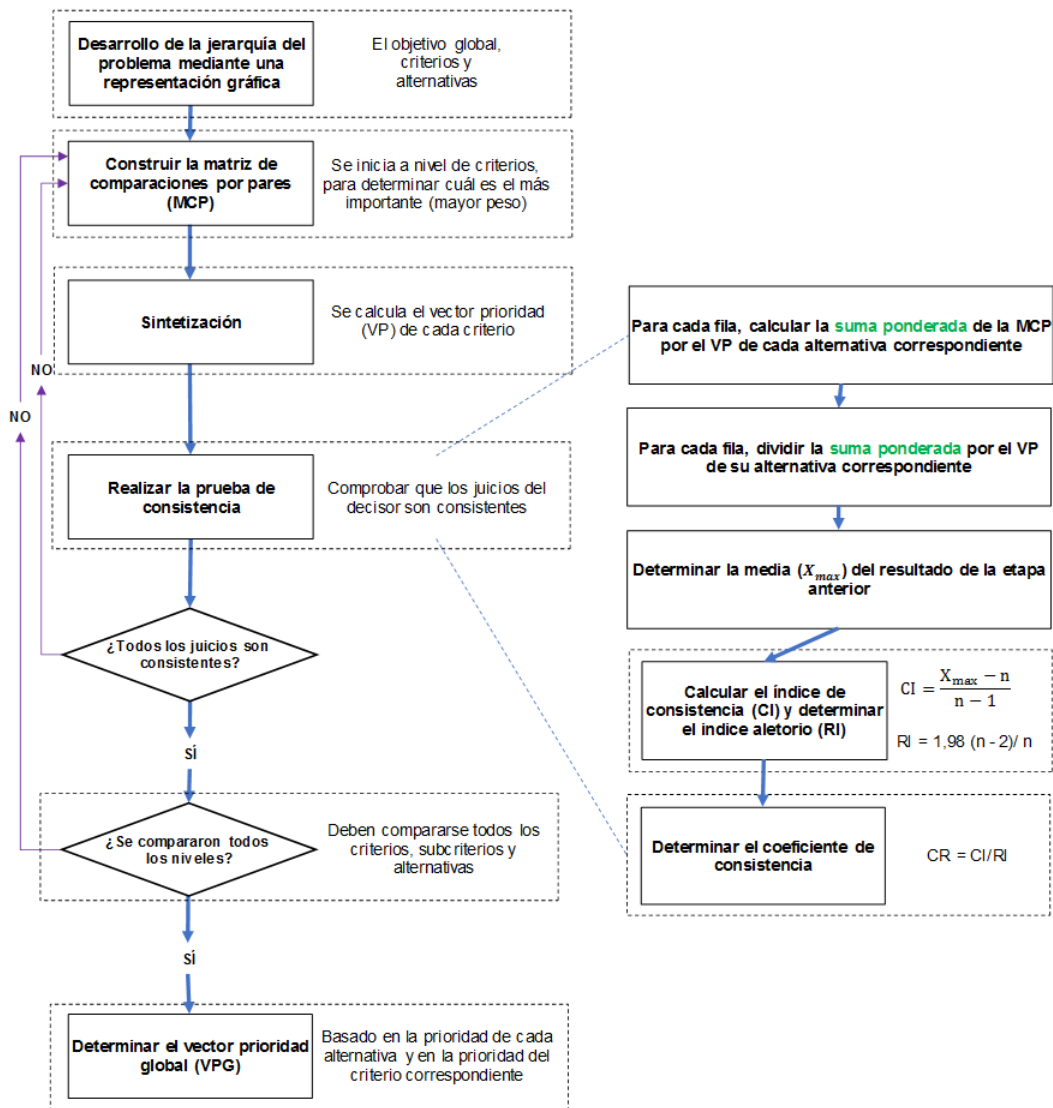


Figura 7: Diagrama de flujo del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ).

Fuente: Figueroa (2019)

2.15 DISTRIBUCIÓN DE UNIFORMIDAD (DU) Y EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE RIEGO (ER)

La fórmula de la distribución de uniformidad que se utiliza para la evaluación de sistemas de riego que están operativos, se presenta a continuación:

$$DU = (q_{25} / q_m) * 100$$

DU = Distribución de uniformidad (%).

q_m = Caudal medio de la muestra de emisores operados la presión de referencia de la subunidad de riego.

q_{25} = Caudal medio del 25 % de los emisores de menor caudal de la subunidad de riego.

Se presenta a continuación el desarrollo de la fórmula de la distribución de uniformidad se utiliza para diseñar subunidades de riego.

Se considera que los caudales obtenidos por los factores constructivos obedecen a la distribución normal, y la ecuación matemática de la distribución es:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}x\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

La función se presenta en la Figura 8 y tiene las siguientes características:

La frecuencia máxima, se presenta en el valor medio del eje x.

El 68.27 % de los eventos, esta entre $(q_m - \sigma)$ y $(q_m + \sigma)$

$$cv = \sigma/q_m$$

cv = Coeficiente de variación de fabricación

σ = Desviación estándar.

El intervalo también se puede expresar como:

$$(1 - cv) * q_m \text{ y } (1 + cv) * q_m$$

Por analogía:

Eventos (%)	Rangos que se encuentran
68.27	$(1 - cv) * q_m$ y $(1 + cv) * q_m$
95.00	$(1 - 1.96 cv) * q_m$ y $(1 + 1.96 cv) * q_m$
99.00	$(1 - 2.58 cv) * q_m$ y $(1 + 2.58 cv) * q_m$

Si se toma el 25 % de los caudales más bajos, el valor medio es:

$$q_{25} = (1 - 1.27 cv) * q_m$$

Reemplazando se obtiene el coeficiente de distribución constructivo (DU_c)

$$DU_c = q_{25} / q_m * 100$$

$$DU_c = (1 - 1.27 cv) * 100$$

$$DU_c = (1 - 1.27 cv / n^{0.5}) * 100$$

n = número de emisores por planta, a mayor valor de n , existe la menor probabilidad que todos los emisores de la planta pertenezcan al 25 % más bajo.

Los caudales en los emisores no son iguales, debido a las diferentes presiones ocasionadas por las pérdidas de carga y topografía, presentando un coeficiente de distribución hidráulico (DU_h).

$$DU_h = q_{\min} / q_m$$

q_{\min} = Caudal del emisor sometido a la menor presión.

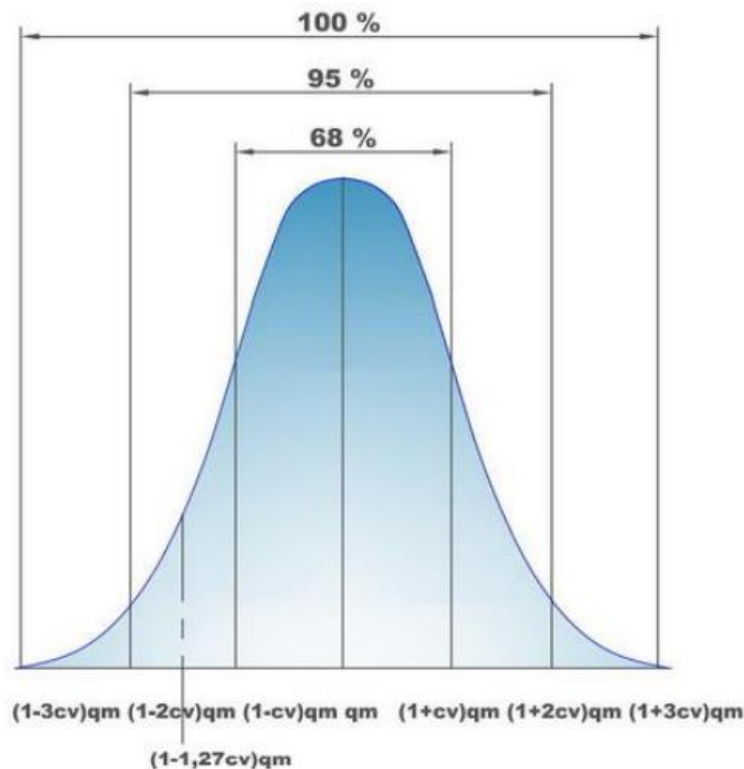


Figura 8: Distribución normal de la calidad de fabricación del caudal del emisor.

Fuente: Pizarro (1996)

Fórmula de coeficiente de distribución de uniformidad que se utiliza para el diseño

$$DU = (1 - 1.27 * C_v / n^{1/2}) (q_{\min} / q_m) * 100$$

Para obtener la DU que el diseñador propone, se debe calcular las pérdidas ocasionadas por la fricción y topografía, en la subunidad de riego una determinada presión y calcular la pérdida de carga permisible, que obedece a la siguiente ecuación para emisores no auto compensados:

$$\Delta H = 2 (h_m - h_{\min})$$

ΔH = Pérdida de carga máxima permisible (m.c.a) en la subunidad, para alcanzar el DU propuesto.

En la Figura 9, se presenta el diagrama de presiones de la subunidad de riego para suelo plano.

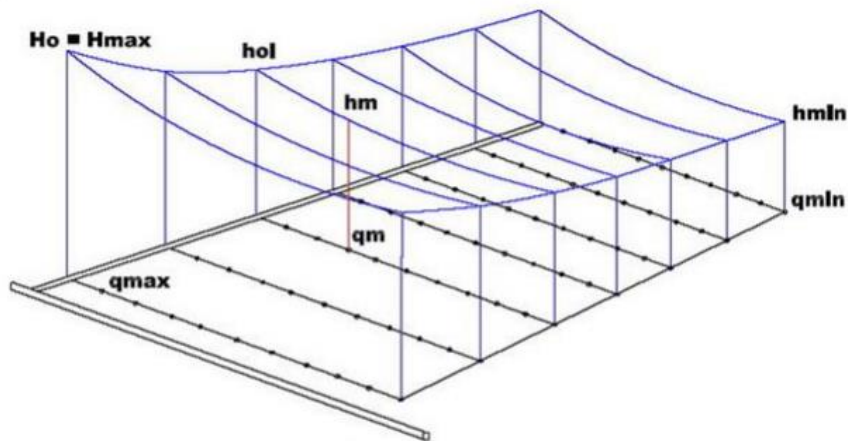


Figura 9: Diagrama de presiones de la subunidad de riego.

Fuente: Pizarro (1996)

- Hmax = Presión en la entrada de la subunidad.
- qmax = Caudal máximo de un gotero en la subunidad.
- hol = Presión al inicio del lateral promedio de la subunidad.
- hm = Presión promedio de los goteros.
- qm = Caudal promedio de los goteros.
- hmin = Presión mínima del gotero.
- qmin = Caudal mínimo del gotero.

En los emisores auto compensados la máxima pérdida permisible dependerá de la diferencia de presión mínima y máxima para emitir un caudal constante del gotero, especificada en las hojas técnicas (Figura 10). y el coeficiente de distribución de

uniformidad dependerá de coeficiente de variación de fabricación es decir de la calidad de fabricación del gotero, que deberá ser menor al 7% y el número de goteros por planta.

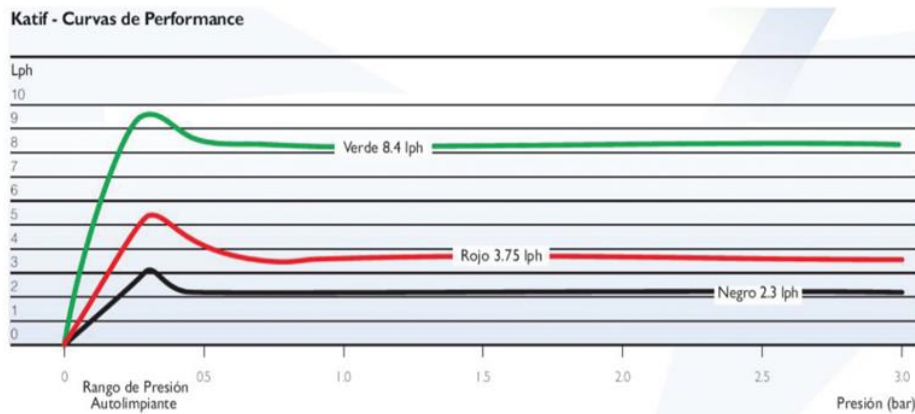


Figura 10: Gotero auto compensado Katif.

Fuente: Cepex (2018)

El criterio netamente hidráulico también es utilizado para definir la pérdida de carga permisible en las subunidades de riego para el diseño, donde se asume que el coeficiente de variabilidad de los emisores es cero, es utilizado comúnmente para goteros y aspersores siendo el exponente del emisor es 0.5, valor típico de un orificio en régimen turbulento que cumple: *la variación de caudales del 10 % corresponde a una variación de presiones del 20 %*, en la Figura 11, presenta el desarrollo de la relación anterior. En la Figura 12, se presenta gráficamente los riegos uniformes y no uniformes.

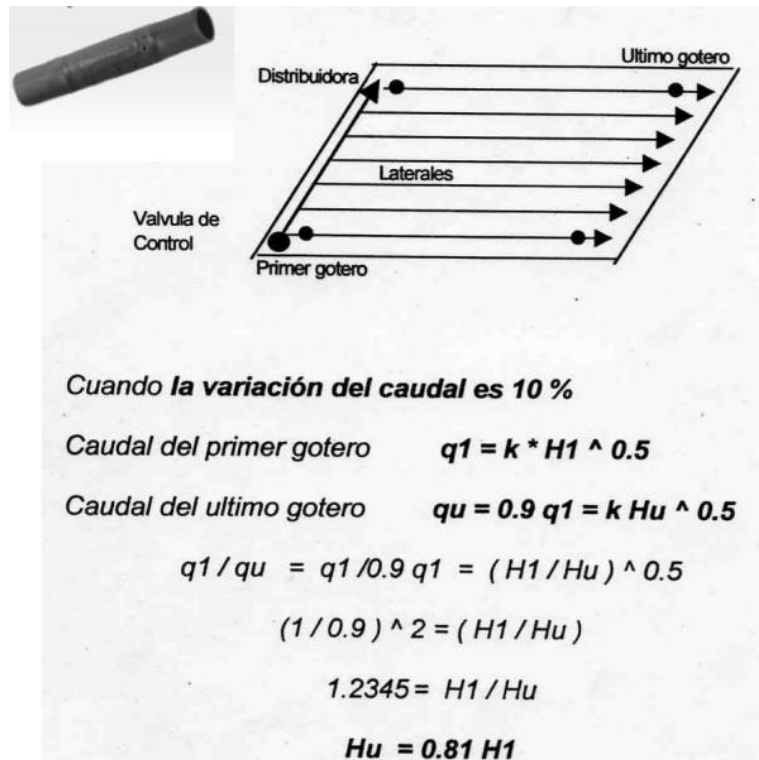


Figura 11: Relación de la presión y caudal para emisores de flujo turbulento.

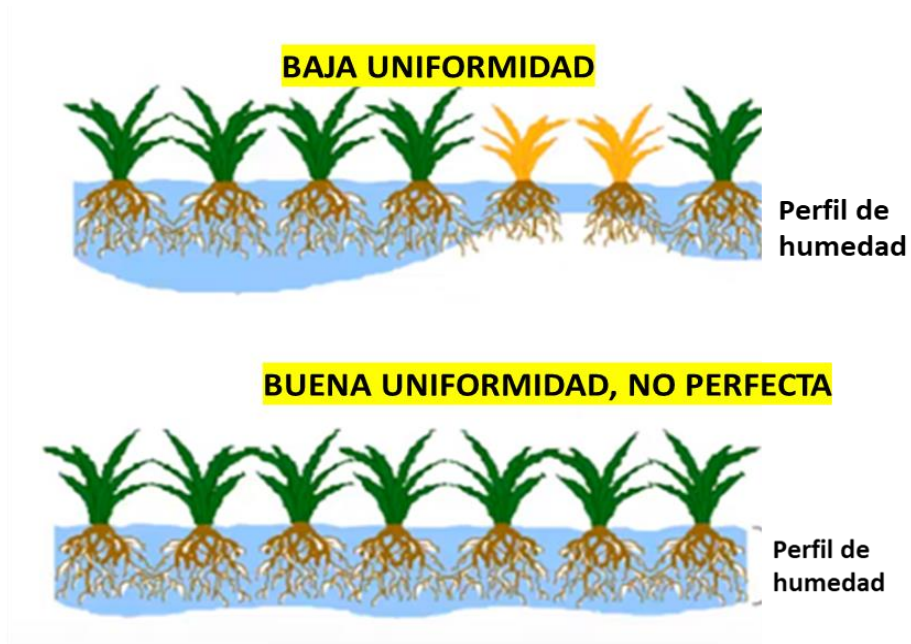


Figura 12: Riego uniforme y no uniforme.

Eficiencia aplicación de riego (E_r)

Es la relación entre la lámina neta o requerimiento de agua por las plantas y lámina bruta o lámina aplicada.

$$E_r = L_n / L_b$$

L_n = Lámina neta.

Lb = Lámina bruta.

La eficiencia de aplicación de riego también puede expresarse en función de la distribución de uniformidad, la percolación profunda y el requerimiento de lavado que está en función de la conductividad eléctrica del agua de riego y la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo, que depende de la sensibilidad a las sales del tipo de cultivo y el rendimiento deseado.

$$Er = DU * (1 - K)$$

$$K = Pp$$

Pp = Percolación profunda en décimas.

$$Er = DU * (1 - K)$$

$$K = RL$$

$$RLg = Ce w / 2 Ce ext.$$

$$RLa = Ce w / (5 Ce ext. - Ce i)$$

$$Lb = Ln / Er = Ln / (CU * (1 - K))$$

RL = Requerimiento de lavado para riego por goteo (RLg) y aspersión (RLa) en décimas.

Ce w = Conductividad eléctrica del agua en el suelo.

Ce ext. = Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo, para el cálculo de la lámina de lavado, está en función del cultivo y rendimiento deseado.

Los siguientes factores que influyen en la eficiencia de riego:

- Calidad física, química y biológica del agua.
- Adecuada infraestructura de toma principal (Tomas o bocatomas) y canales de conducción y distribución, para garantizar el reparto del agua con la oportunidad, cantidad y calidad adecuada (Turnos de riego a nivel de junta de usuarios).
- Sensibilidad del cultivo a las sales.
- Variables climáticas: Viento, temperatura, evaporación y humedad relativa (evaporación y arrastre de gotas por efecto del viento cuando se riega por aspersión).
- Calidad del diseño del sistema de riego expresado en la distribución de uniformidad, en la selección adecuada de los diámetros de la red de tuberías a nivel de la subunidad, topografía, tipo emisor, régimen hidráulico del emisor y calidad de fabricación expresado en el coeficiente de variabilidad.

- Características físicas del suelo como la textura, estructura, densidad, compactación, infiltración, materia orgánica y pedregosidad.
- Tamaño y forma del área de la subunidad del riego por aspersión.
- Reservorios a nivel de fundo o parcela diseñados en base a los turnos de riego y autonomías adecuadas, para el uso del agua en los momentos oportunos que requieran las plantas.
- Mantenimiento del sistema de riego, en los emisores, red, válvulas, filtros y bombas.
- Operación del sistema de riego, si es manual o automática.
- Telecontrol del sistema de riego.

La condición previa a una elevada eficiencia de riego, es que el riego deberá ser uniforme, como se presenta en la Figura 13.



Figura 13: Riego uniforme y eficiente.

2.16 SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADOS

2.16.1 Riego por aspersión

El riego por aspersión simula la lluvia con una determinada intensidad y uniformidad sobre el área a regar provocando la infiltración en el suelo, en las áreas verdes urbanas se utiliza diferentes aspersores como: los difusores, rotores, micro aspersores, aspersores de impacto y cañones entre otros. El riego por aspersión permite obtener la distribución de uniformidad y eficiencias superiores al riego por gravedad, siempre que el diseño, operación y mantenimiento sean los adecuados. El exponente del emisor en aspersión

normalmente este alrededor de $x= 0.5$, opera en flujo turbulento y el criterio de diseño es hidráulico y obedece a la siguiente regla: Una variación del 10 % del caudal entre los emisores más diferenciados debido a la lejanía o topografía, corresponde a una variación de presión de trabajo de los emisores del 20 %. El criterio que la velocidad sea entre 0.5 a 3 m/s, es utilizado para la selección del diámetro de tuberías de las subunidades de riego (laterales y ´porta laterales). En la Figura 14, presenta los difusores y en la Figura 15, se presenta radios, caudales y presiones de los rotores.

Bajo caudal		Alto caudal			
Toberas giratorias de alta eficacia		Toberas de alta eficacia		Toberas estándar	
					
					
R-VAN	Rotary	HE-VAN	U-Series	VAN	MPR y SQ
Variable	Arco fijo	Variable	Arco fijo	Variable	Arco fijo

Figura 14: Difusores.

Fuente : Rain Bird (2017)



Figura 15: Radios, caudales y presiones de los rotores.

Fuente : Rain Bird (2017)

El coeficiente de distribución uniformidad deseado cuando se utiliza rotores para jardines, están por encima del 70 %, y para difusores del 60 %, lo que permitirá obtener la eficiencia de riego adecuada.

2.16.2 Riego por goteo subsuperficial (RGS)

Según (Lamm et al. 2012), es la aplicación de agua bajo la superficie del suelo utilizando goteros, los cuales entregan agua con caudales similares al riego por goteo superficial. El RGS se consolida como el más reciente avance en el ámbito de sistemas de irrigación, porque contribuye al objetivo del riego tecnificado de poder obtener altas eficiencias de aplicación al evitar o reducir las pérdidas directas por evaporación, percolación profunda y escorrentía. El RGS es considerado como la tecnología más eficiente para el manejo del agua y de nutrientes a las plantas, el adecuado diseño de RGS genera valores de eficiencia de riego alrededor del 95 %, donde el agua es almacenada en la zona de raíces para beneficio de los cultivos (Bourziza *et al.* 2014).

El RGS permite realizar otras actividades simultáneamente al riego, y no expone a los usuarios de las áreas verdes urbanas a las aguas contaminadas tratadas, si fueran utilizadas,

además disminuye los actos vandálicos, como los robos de los emisores del sistema. Sin embargo, este sistema requiere un alto costo de inversión inicial y una adecuada operación y mantenimiento (Figura 16).



Figura 16: Riego por goteo subsuperficial.

Fuente: Rain Bird (2017)

2.17 SELECCIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE LOS DIÁMETROS DE LA RED DE TUBERÍAS

La selección de los diámetros de la red de tuberías en un sistema de riego presurizado debería ser basada en un análisis técnico y económico. Diámetros pequeños pueden requerir baja inversión inicial, pero las pérdidas de carga son mayores incrementando el costo energético de bombeo, de forma similar las tuberías de mayor diámetro incrementan la inversión inicial pero disminuyen el costo energético (Arunjyoti *et al.* 2016).

La selección de los diámetros pequeños de las tuberías de la red para disminuir la inversión inicial puede conducir a un mayor costo final, considerando los altos costos energéticos en el periodo de vida del proyecto, los cuales que serán asumidos por los usuarios. Motivo por el cual es recomendable realizar una selección técnica –económica de las tuberías, de tal forma de garantizar las presiones y caudales en las válvulas red, con una adecuada selección de tuberías e implementar la red más económica considerando loa costos fijos (inversión inicial) y costos variables (costos energéticos). Existen muchos algoritmos que nos ayudan a obtener este objetivo, como el simplex.

Los costos variables son generados al utilizar electrobombas para presurizar los sistemas. Los requerimientos de energía son calculados conociendo el caudal de bombeo, la carga dinámica total y la eficiencia de la bomba y motor. Los requerimientos de energía son expresados en kilowatts - hora o litros de Diesel -hora de operación de los motores. La potencia consumida por el motor eléctrico es la relación de la energía consumida por la bomba entre la eficiencia del motor, valores que son proporcionados por los fabricantes. Las eficiencias de los motores pueden variar del 75 al 95 %. El costo energético anual es el producto del S./ kw-hr multiplicada por las horas anuales de operación y la potencia del motor (Arunjyoti *et al.* 2016).

Costo fijo anual

El factor de recuperación de capital permite anualizar el valor presente neto de un bien para poder realizar la comparación con los valores anualizados de la energía, sumarlos y seleccionar los diámetros de las tuberías más económicas para la red.

$$Frc = i (1+i)^n / ((1+i)^n -1)$$

Frc = Factor de recuperación del capital para series uniformes.

i = Interés anual o mensual.

n = años o meses.

Costo fijo anual se presenta a continuación:

$$P = A * i (1+i)^n / ((1+i)^n -1)$$

P = Cuota anualizada o mensualizada.

A = Valor presente neto.

Costos de energía anual

Se presenta a continuación

$$C (S/. /año) = S/. / Kw-hr * Kw* Hr./ año$$

C (S/. /año) = Costos de energía anual

S/. / Kw-hr = Costo del kilowatt por hora

Kw = Potencia del motor

Hr /año = Horas de operación por año

$$\text{Hr/ año} = \text{Vol} / Q_b$$

Vol = Volumen de bombeo anual (m³)

Q_b = Caudal de la bomba (m³/hr)

Selección técnica económica de los diámetros

La selección óptima del diámetro de tuberías, es el diámetro que presenta el costo fijo más el costo de operación mínimo. Los costos fijos incluyen costo de tuberías, instalación y de la bomba y motor. El costo de operación son los costos energéticos (Figura 17).

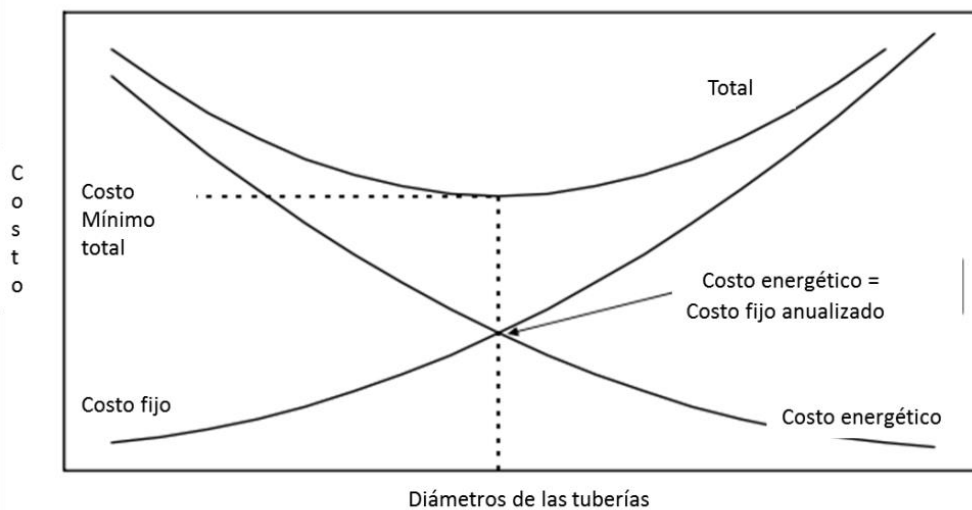


Figura 17: Selección técnica económica de tuberías.

2.18 BOMBAS, CURVAS DE LAS BOMBAS, LEYES DE AFINIDAD, VARIADOR DE FRECUENCIA

2.18.1 Binomio agua y energía

La eficiencia energética en las áreas verdes urbanas se deben trabajar con el nexo directo agua/energía, en la medida que se ahorre y sea más eficientes en el uso del agua, también se estará ahorrando y utilizando más eficientes la energía (Comunidad de Madrid 2012).

Los proyectos de riego han experimentado en las últimas décadas una transformación como consecuencia de la aplicación de tecnologías de distribución del agua a presión utilizando los sistemas de riego como aspersión y goteo, mejorando la gestión de unos recursos hídricos limitados, debido a este cambio los proyectos de riego presurizados son uno de los principales consumidores de energía en la agricultura, por el costo energético

que se requiere para el sistema de bombeo del sistema. El costo energético puede superar al costo de inversión inicial, dependiendo de la fuente de energía, el horizonte del proyecto, diseño y selección de los componentes del sistema como los siguientes: Los emisores, las redes de tuberías, el cabezal del sistema, eficiencia del sistema de bombeo.

2.18.2 Curvas de las bombas

Bomba centrífuga es una maquina capaz de convertir la energía cinética en energía de presión, realiza la transformación de la energía mecánica en hidráulica.

Las características de una bomba centrífuga se presentan mediante las siguientes curvas: Altura dinámica total, potencia, eficiencia y net positive suction head (NPSH) en función del caudal (Figuras 18 y 19).

Las curvas de la bomba están diseñadas de acuerdo a ISO 9906: 2012, que especifica las tolerancias de las curvas: variación de caudal $Q \pm 9\%$, variación de carga dinámica total ADT $\pm 7\%$, variación de potencia $P +9\%$ y variación de eficiencia $\eta \pm 7\%$ (Grundfos bombas 2018)

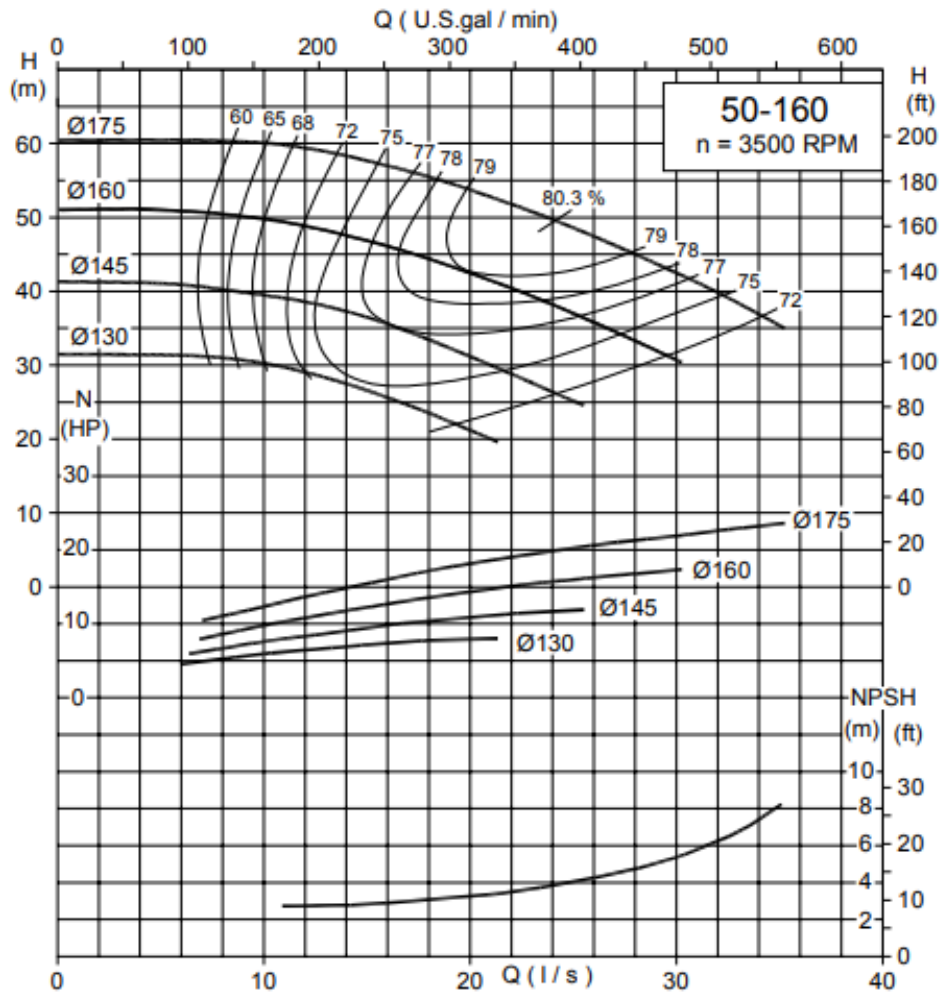
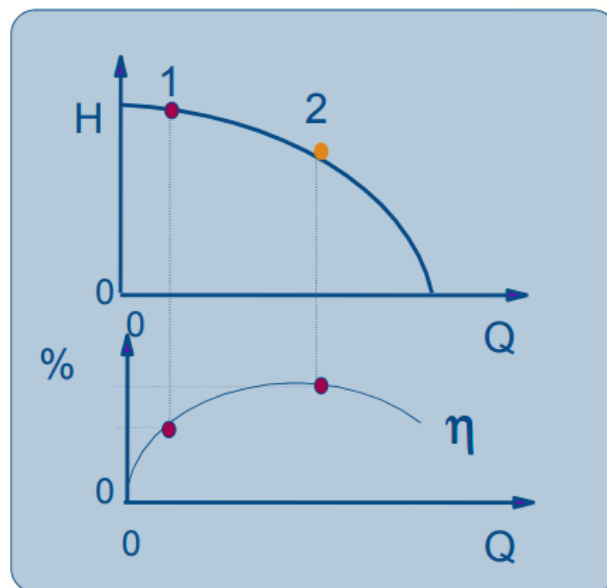


Figura 18: Curvas de las bombas.

Fuente : Hidrostral (2015)



**Figura 19: Punto de operación de la bomba: 1 punto de trabajo con pobre eficiencia,
2 punto de trabajo con buena eficiencia.**

Fuente: Comunidad de Madrid (2012)

Los niveles de potencia que se presenta en la Figura 20.

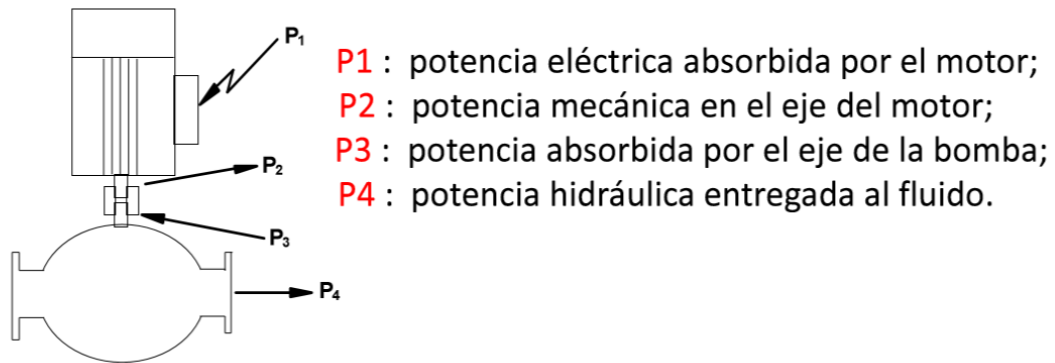


Figura 20: Potencias del sistema de bombeo.

Fuente: Grundfos (2015)

2.18.3 Demanda de energía en una instalación de riego

Los sistemas de riego presurizados necesitan energía, para que los emisores realicen una uniforme distribución del agua sobre la superficie a regar. La energía hidráulica puede ser suministrada mediante una estación de bombeo (Comúnmente en la costa) o por una diferencia de niveles topográficos (Mayormente en la sierra). Las condiciones de trabajo de una bomba están definidas por sus curvas características. Para un determinado número de revoluciones por minuto "n", las tres curvas características de la bomba relacionan la altura dinámica total (ADT), el rendimiento (η) y la potencia (N) con el caudal bombeado (Q). Para que una tubería de longitud L y diámetro D transporte un caudal Q es necesario que la bomba aporte una energía ADT (Figura 21a).

La energía de la ADT tiene una componente estática H_g (altura geométrica de elevación) y una componente dinámica $\Sigma\Delta H$ (pérdidas de carga por fricción y singularidades), que varía con el caudal y el diámetro de la conducción, constituyendo la denominada "curva característica de la conducción" de la siguiente ecuación.

$$ADT = H_g + \Sigma\Delta H = H_g + KQ^2$$

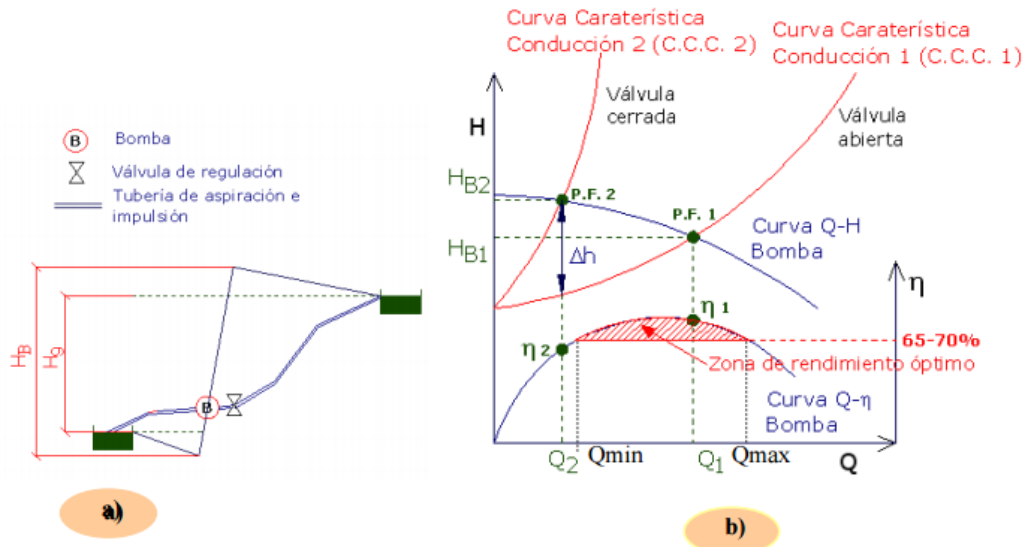


Figura 21: a) Esquema de funcionamiento de una impulsión con regulación de caudal por medio de válvula de compuerta. b) Curvas características y punto de funcionamiento de la instalación.

Fuente: SIAR (2009)

La ecuación, se representa en la Figura 21b. La intersección de la “curva característica de la conducción” con la “curva característica Q - H de la bomba” presenta el punto de funcionamiento o de trabajo de la bomba (P.F. 1 de la Figura 21b). Cuando las condiciones de funcionamiento de la bomba son constantes, el punto de operación de la bomba (Q_1 , H_1) es el punto de máximo rendimiento. En los sistemas de riego los puntos de operación de la bomba varían por turnos de riego, debido: a) Caudales diferentes ocasionado por tener diferentes áreas y b) ADT diferentes debido al distanciamiento al cabezal, topografía y diámetros de la red seleccionados. Motivo por el cual se busca que los puntos de trabajo operación trabajen dentro de la “zona útil de funcionamiento” ($Q_{max} - Q_{min}$), donde el rendimiento permanece por encima de un mínimo (zona rallada en rojo en la Figura 21b). El caudal de la bomba puede disminuirse cerrando la válvula de regulación (Figura 21a), lo que modifica la curva característica de la conducción (Figura 21b), pasando al punto C.C.C.2 (Figura 21 b). Esta regulación debe hacerse sin bajar del Q_{min} para que el rendimiento de la bomba no escape de la zona de rendimiento óptimo (65-70%) (SIAR 2009).

Al cerrar la válvula de regulación situada a la salida de la bomba, Figura 21a y al modificarse la curva C.C.C1, pasando a la C.C.C 2, el punto de funcionamiento se desplaza

a P.F.2, como se observa en la Figura 21b, no se modifica la curva característica (Q-H) de la bomba. La pérdida de carga producida por la válvula (Δh , en Figura 21b) es una energía que se pierde, por lo que regular el caudal bombeado cerrando la válvula no es un método muy eficiente, pudiendo provocar además que la bomba trabaje fuera de la zona útil de funcionamiento como ocurre en el P.F.2 (Figura 21 b). La potencia eléctrica que consume la bomba para suministrar la energía que necesita el agua se presenta a continuación:

$$P = Q * ADT / (102 * Eb * Em)$$

P = La potencia consumida en Kw.

Q = El caudal bombeado en l/s.

ADT = Altura dinámica total en m.c.a

Eb = Eficiencia de la bomba en decimal.

Em = Eficiencia del motor en decimal.

2.18.4 Eficiencia del grupo bomba y motor

Un grupo motor-bomba consta de una bomba hidráulica y un motor. El rendimiento del motor, que transforma energía eléctrica en energía mecánica, esta entre el 90-95%. El rendimiento de la bomba, que transforma energía mecánica en energía hidráulica, esta entre 70-80% en bombas de tamaño medio y grande, y por debajo de esos valores en bombas pequeñas. El rendimiento de un grupo motor-bomba que se encuentre entre los valores de eficiencia total del 65-70% es lo deseable. Cuando se diseña una instalación de riego, la selección de la bomba a instalar debe realizarse de forma que el punto de funcionamiento de la misma (Figura 21 b) se encuentre dentro de la zona útil de funcionamiento, que permita trabajar con un rendimiento superior al 65-70% (SIAR 2009)

2.18.5 Leyes de afinidad de las bombas

Las ecuaciones de afinidad que se presentan en el Cuadro 4 y la Figura 22. Una bomba para una velocidad de giro dada en r.p.m, es posible predecir el comportamiento de otra bomba semejante, mediante las relaciones presentadas (Arviza 2002). Se aplican con alta aproximación al cambio de velocidad de bombas centrifugas. Los rendimientos del variador de frecuencia y del motor se deben considerar para el cálculo del ahorro de potencia, luego de reducir la velocidad de la bomba.

Cuadro 4: Leyes de afinidad.

Fuente: Grundfos bombas (2018)

$Q1/Q2 = N1/N2 = D1/ D2$	El caudal (Q) es proporcional a la velocidad (N)
$H1/H2 = (N1/N2)^2 = (D1/D2)^2$	La altura (H) es proporcional a la velocidad (N) elevado al cuadrado
$P1/P2 = (N1/N2)^3 = (D1/D2)^3$	La potencia (P) es proporcional a la velocidad (N) elevado al cubo

La reducción de velocidad provocara una leve reducción del rendimiento, pero no cambia el hecho que se consigan grandes ahorros de potencia mediante el control de velocidad.

La fórmula para calcular el rendimiento se presenta:

$$\eta_x = 1 - (1 - \eta_n) \times \left(\frac{n_n}{n_x}\right)^{0.1}$$

Se obtiene una buena aproximacion hasta disminuir un 40 % de la velocidad máxima.

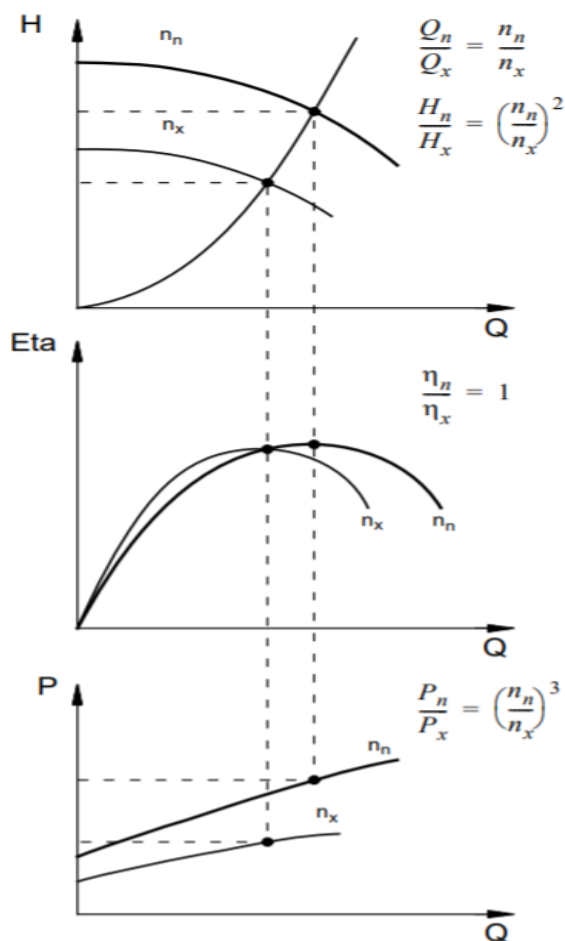


Figura 22: Leyes de afinidad.

Fuente: Grundfos bombas (2018)

2.18.6 Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia es un aparato electrónico que se utiliza para el control de la velocidad de rotación de un motor asíncrono o en jaula de ardilla. El variador de velocidad se instala entre la red y el motor. El variador recibe la tensión y la frecuencia de red de 50 o 60 hercios (Hz) y es convertida y ondulada para producir una tensión con frecuencia variable. La velocidad del motor es proporcional a la frecuencia. Un cambio de la frecuencia provoca también un cambio de voltaje en el motor, para asegurar que existe el par necesario en el eje del motor y evitar problemas de sobrecalentamiento.

El variador de frecuencia permite variar la velocidad rotacional de un motor, actuando sobre la frecuencia de la corriente eléctrica, las leyes de afinidad presentadas relacionan el caudal, la presión y la potencia eléctrica con la velocidad rotacional del motor. Al variar la velocidad de giro del motor, varía también el caudal, la presión y la potencia eléctrica, siendo necesario realizar la programación del variador de frecuencia con las características del motor asociado. Con un variador de frecuencia tenemos la posibilidad de reducir la velocidad de una bomba centrífuga, adecuando los caudales y presiones a la demanda requerida de los puntos de operación de los turnos de riego de un sistema de riego presurizado, garantizando que la bomba trabaje en los puntos de máxima eficiencia, lo que permitirá el ahorro de energía y costo energético, además de disminuir las emisiones de CO₂.

El funcionamiento del variador tiene tres etapas:

Etapa 1, se produce la rectificación de la corriente alterna procedente de la red eléctrica mediante un puente de diodos (puente rectificador). El puente rectificador es un dispositivo electrónico que permite convertir la corriente alterna en corriente continua. Está formado por diodos rectificadores.

Etapa 2, mediante el Bus CC se elimina el rizado de la señal continua y se consigue una señal de corriente continua lo más plana posible, para mejorar esta señal y conseguir aplanarla se utilizan filtros de condensadores.

Etapa 3, El puente inversor convierte la señal de corriente continua en una señal trifásica de corriente alterna. Con la activación selectiva de interruptores electrónicos (transistores)

se consigue modificar la tensión y la frecuencia de la señal. Con la tensión se controla el par o fuerza de giro del motor y mediante la frecuencia se varía la velocidad del motor. Los filtros tienen la función de mejorar las señales eléctricas de salida por un lado y corregir las perturbaciones eléctricas (armónicos) generadas por los elementos electrónicos del variador y por los motores. En la Figura 23, se presenta el proceso del funcionamiento del variador de frecuencia.

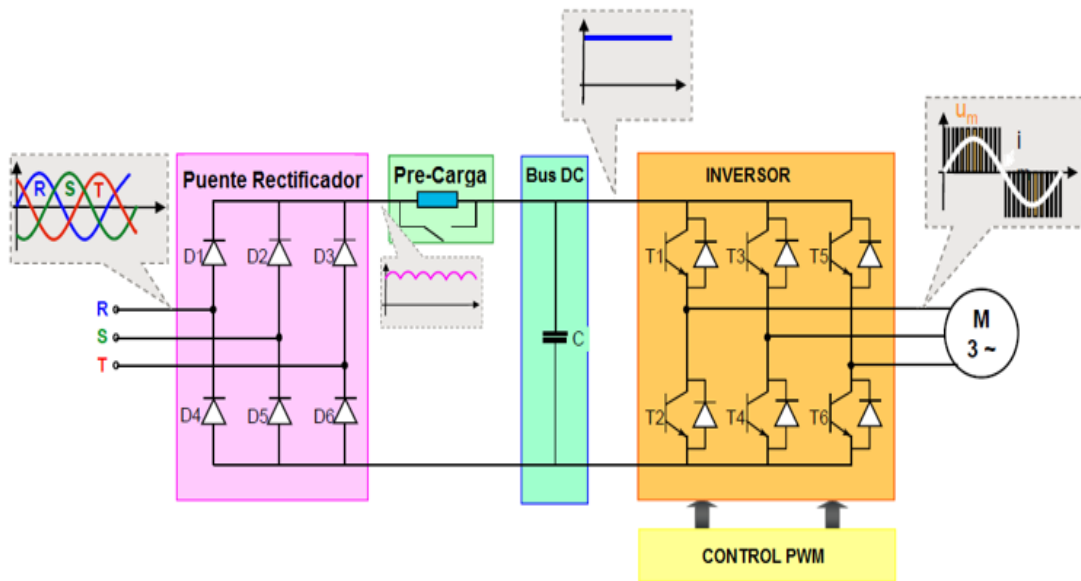


Figura 23: Principios de funcionamiento de un variador de frecuencia.

Fuente: Grundfos (2015)

2.18.7 Regulación de caudal en bombas

a) Regulación por estrangulamiento con válvula en serie

En la Figura 24, se modifica la apertura de una válvula ubicada en la salida de la bomba. Al cerrar la válvula, cambia la curva resistente de la instalación, siendo posible reducir el caudal de impulsión hasta el valor deseado. El rendimiento de la bomba subirá o bajará según la posición de partida respecto al máximo. Es el método más empleado; no es energéticamente eficiente, y se consigue una disminución de la energía total consumida.

Si la estrangulación se realiza en la tubería de aspiración, se podría provocar cavitación en la bomba, la estrangulación se realiza siempre en la zona de presión de impulsión de la bomba.

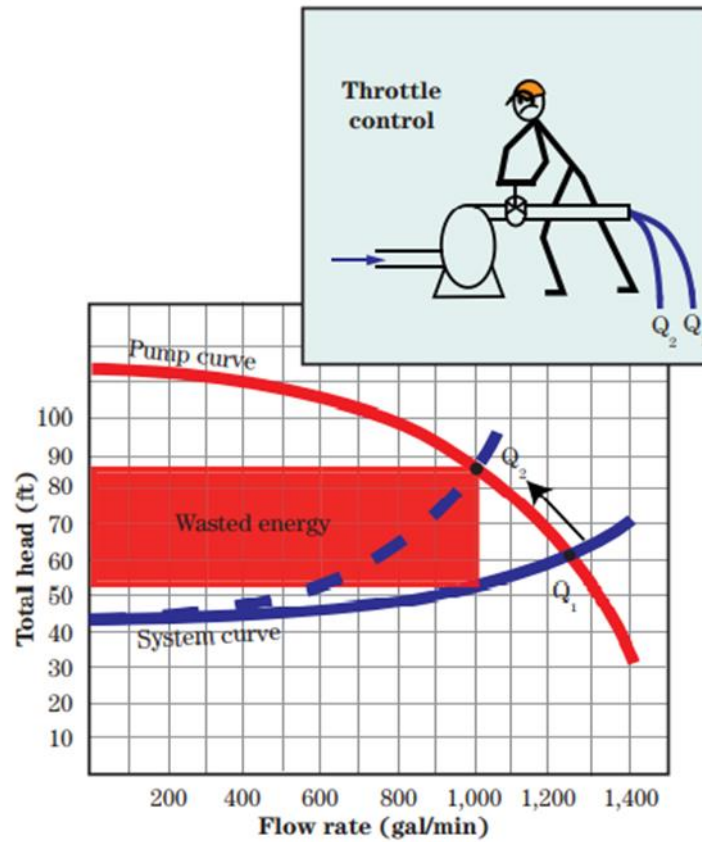


Figura 24: Ajuste del caudal por estrangulamiento con válvula en serie.

Fuente: Fuente :Natural Resources Conservation Services (2014)

b) Regulación por estrangulamiento con válvulas en paralelo

En la Figura 25, se regula mediante una válvula instalada en paralelo a la bomba, una parte del caudal bombeado recircula sin recorrer el circuito. El sistema evita las sobrepresiones que se producen con las válvulas dispuestas en serie, pero se derrocha inútilmente una energía para bombear un caudal para recircularlo por la bomba. Es el peor sistema de regulación desde el punto de vista energético.

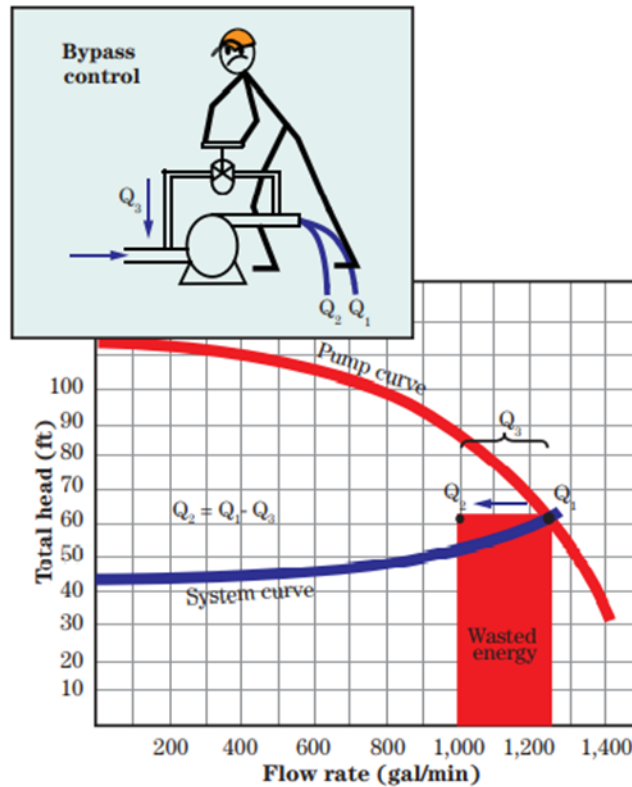


Figura 25: Ajuste del caudal por estrangulamiento con valvula en paralelo.

Fuente: Fuente :Natural Resources Conservation Services (2014)

c) Regulación con variador de frecuencia

La zona de máximo rendimiento es limitada, en algunos casos puede ser conveniente hacer funcionar la bomba a menor velocidad para disminuir el caudal y la altura manométrica tras una reducción de carga del sistema. La velocidad de la bomba se reduce por vía electrónica mediante un variador de frecuencia, la bomba suministra una altura manométrica más baja que cuando funciona a velocidad constante, de tal forma que se consigue disminuir la potencia, afectando en forma mínima el rendimiento. El cambio el régimen de giro de la bomba, modifica la curva característica, y el punto de funcionamiento. Se trata de un sistema muy eficiente desde el punto de vista energético (Figura 26 y 27).

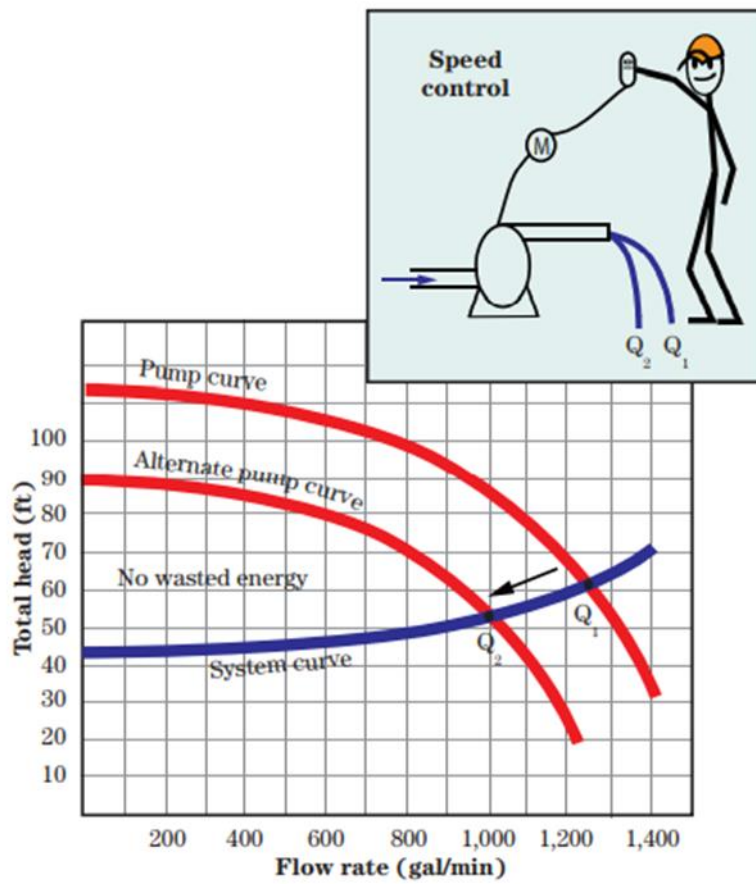


Figura 26: Ajuste del caudal utilizando variadores de velocidad.

Fuente :Natural Resources Conservation Services (2014)



Figura 27: Motor con variador de frecuencia, Laboratorio de Recursos Hídricos, UNALM.

2.19 AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS SISTEMAS DE RIEGO

El ahorro de la energía se puede realizar mediante los siguientes medios:

- La disminución de los consumos de agua de los cultivos, debido al mejor conocimiento del requerimiento de agua de las plantas, mediante los coeficientes del cultivo (K_c) y/o los factores de riego obtenidos cuando la planta está bajo estrés controlado, que permiten mantener el cultivo en condiciones rentables o una apariencia adecuadas visualmente en caso de áreas verdes urbanas, que permitan el ahorro de agua y como consecuencia de energía en los sistemas presurizados.
- Siembra y manejo de cultivos de bajo requerimiento hídrico, propias de zonas áridas, caso de Lima.
- Construcción de reservorios a nivel de fundos o conjunto de parcelas, y garantizar el cumplimiento de la asignación del agua de riego por turnos, lo que permitirá el manejo adecuado del agua en función de requerimiento de agua de los cultivos.
- Ubicación adecuada de la estación de bombeo considerando la ubicación de la fuente de agua, la topografía, sectores de riego y disposición de bombas.
- Modernización de los sistemas de riego, se requiere el cambio de sistemas de riego de gravedad a sistemas de riego presurizado como aspersión, microaspersión y goteo, en los cuales es posible el mejor control y manejo del agua.
- Asesoramiento continuo a las personas encargadas de realizar la operación y mantenimiento de los sistemas presurizados.
- Selección adecuada de los emisores, válvulas y filtros que requieran baja presión de operación.
- Diseño de redes con criterios técnicos hidráulicos y económicos para su optimización.
- Selección adecuada del sistema de bombeo, se debe evaluar la mejora de rendimientos en los equipos de impulsión, mediante el uso de variadores de frecuencia para funcionamiento de bombas con diferentes puntos de operación (requerimientos diferentes caudales y presiones por turno de riego)
- Automatización mediante controladores y telecontrol para una mejor operación y control de los sistemas de riego desde cualquier lugar y hora, utilizando la nube.
- Elección de la tarifa eléctrica más adecuada y mejora del factor de potencia de los motores.
- Selección de motores de alta eficiencia como los premium.

La mejora de la eficiencia energética de los sistemas de riego a presión va a disminuir los costos de operación, además del efecto positivo sobre el medio ambiente porque disminuye el requerimiento de energía y la emisión de CO₂. Además de los beneficios directos para el usuario, por la mejora de sus condiciones de trabajo, mayor disponibilidad de tiempo y mejora económica (Instituto para la diversificación y ahorro de la Energía I 2005).

2.20 HUELLA DE CARBONO Y EMISIÓN DE CO₂

La huella de carbono es un indicador ambiental para cuantificar la cantidad de emisiones de gases del efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, actividades o producto, se mide en masa de CO₂ equivalente. Su medición se convierte en una herramienta que permite trabajar bajo el concepto de eco-eficiencia e identificar oportunidades de reducción de consumo energético, debido que este último es la principal fuente de emisión de gases de efecto invernadero a nivel mundial (Rodríguez *et al.* 2014).

Los sistemas de riego a presión son dependientes de energía, el costo económico que supone este consumo es cada vez mayor, los costos energéticos han ido aumentando de manera constante durante los últimos años debido a la modernización de los sistemas. Por otra parte, el cambio climático sigue siendo una preocupación a nivel mundial para gobiernos, empresas y ciudadanos; y es el cálculo de la Huella de Carbono la herramienta que da respuesta a los motivos de dicha modificación climática (Labat *et al.* 2015). En los proyectos de riego presurizados se ha encontrado durante las evaluaciones altas eficiencia de riego o hídrica, pero muy bajas eficiencias energéticas. Los costos de energía se incrementan a mayor velocidad que el costo de agua, por lo que pueden ser limitativos para el desarrollo de los sistemas presurizados, más aun si el petróleo tiene un gran peso en el mix energético (Corominas 2010).

Existe diferentes opciones para reducir el uso energético en los sistemas de riego presurizados y disminuir la producción de CO₂ (Qureshi 2014), se mencionan las siguientes:

- a) Reducir el requerimiento de agua de los cultivos, a través del riego deficitario y el mejoramiento de las prácticas del manejo de agua.

- b) Mejorar la eficiencia energética incrementando la eficiencia global de bombeo, seleccionando motores, bombas y variadores de velocidad de alta calidad. Ubicación y disposición de la estación de bombeo adecuado dentro del ámbito del proyecto.
- c) Utilizar energías renovables como la solar o eólica en los lugares de los proyectos para evitar las pérdidas de transmisión y distribución, además de no producir emisiones de CO₂. La inversión inicial de estas fuentes de energía es alta, pero en un horizonte de largo plazo tienen beneficios económicos y ambientales que deben ser considerados.

III. METODOLOGÍA

3.1 LUGAR DE EXPERIMENTACIÓN

La investigación se desarrolló en las áreas verdes urbanas de la Universidad Nacional Agraria, La Molina (UNALM) en Lima – Perú, que tiene una extensión total de 19.66 hectáreas (ha) de las cuales 15.2 hectáreas se utilizaron para el riego por aspersión del césped americano, para la selección y planificación de las áreas de las plantas de bajo requerimiento hídrico, evaluación de la eficiencia hídrica, energética y la emisión de CO₂. Además, se utilizó la parcela demostrativa de la Facultad de Ingeniería Agrícola con una extensión de 1000 m², para la obtención de los coeficientes del cultivo y riego del césped americano. El periodo de evaluación de los tratamientos de la parte experimental fue de agosto del 2016 a julio del 2017. En la Figura 28, se presenta el área del proyecto.

3.2 SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN Y GOTEO SUBSUPERFICIAL, EQUIPO Y MATERIALES

El trabajo de investigación se desarrolló en los campos de la UNALM y se contó con los siguientes sistemas de riego, materiales y equipo.

- Sistema de riego por aspersión para las áreas verdes urbanas de la UNALM, tiene los siguientes componentes: Una bomba de eje vertical tipo turbina de 30 HP, cabezal con filtro automático Filtomat, sistema de fertiirrigación - venturi, válvulas de control y medición de caudal y presión, red de distribución y emisores como los difusores, rotores y aspersores de impacto, además de un sistema automatizado y tele controlado para la operación, llamado IQ Cloud de Rain Bird.
- Sistema de riego subsuperficial o subterráneo (RGS), adaptado a un diseño de bloques al azar para cuatro tratamientos y tres repeticiones, incluye equipo de bombeo, filtración, válvulas volumétricas, manómetros, 12 unidades experimentales con laterales de riego enterrados Rain Bird, con goteros auto compensados XFS con caudal de 2.3 l/hr.



Figura 28: Área de proyecto, UNALM.

- Tanque evaporímetro Clase A.
- Estación meteorológica automática Davis Pro vantage 2.
- Sensores de humedad del suelo basados en reflectometría del dominio de la frecuencia, FDR, sensores de humedad GS1 Decagon.
- Sensores de humedad del suelo basados en reflectometría del dominio del tiempo, TDR 350 Fieldsout, Decagon.
- Equipo para determinar curvas de retención de humedad y energía, utilizando los platos de presión, Modelo 1600F1 5 Bar y Modelo 1500F2 15 Bar plato cerámico extractor, marca Soil Moisture Equipment Corp
- Podadora de césped, balanza, cámara fotográfica digital, equipo de laboratorio para análisis de suelo.
- Lisímetros de drenaje compuesto de: Volumen de control, sistemas de riego con difusores VAN 4, bomba de vacío y sensores de humedad en base a la conductividad eléctrica (Watermark) instalados en el volumen de control del lisímetro.
- Cámara fotográfica y software fuji para determinar cobertura verde.
- Imágenes del Google, Dron Phantom 4.
- Software Infostat, Epanet, Autocad V.12 y Arc Gis V10.1

3.3 COEFICIENTE DE RIEGO DEL CÉSPED AMERICANO, UTILIZANDO RGS

Para garantizar la uniformidad, color adecuado y cobertura del césped de 100% antes de empezar los tratamientos diferenciados, se aplicaron riegos uniformes durante 20 días. Durante el periodo de evaluación de un año, se realizó el mantenimiento respectivo como el deshierbe de malezas, cortes del césped, riegos del césped, operación y mantenimiento del sistema de riego por goteo subterráneo.

3.3.1 Monitoreo de las variables meteorológicas

Las variables meteorológicas como las temperaturas máxima y mínima, velocidad del viento y dirección, humedad relativa, radiación y evapotranspiración potencial fueron obtenidas utilizando la estación meteorológica automática Davis pro advantage II, cuya

frecuencia de medición de datos fue horaria. La fórmula de Penman Monteith se utilizó para el cálculo la evapotranspiración potencial.

3.3.2 Monitoreo de la humedad del suelo y eficiencia del uso del agua

El monitoreo de la humedad del suelo por el efecto de los diferentes tratamientos y para la evaluación del porcentaje de humedad disponible utilizado (p), se instalaron sensores FDR (Frequency Domain reflectometry), conectados a registradores de datos Em5b de 5 salidas (Decagon Device® USA), programados con el software ECH20® utility versión 1.74, con una configuración de registro horaria. Además, se elaboró la curva de retención de agua en el suelo, para relacionar la energía de retención del agua en el suelo (potencial mátrico) y la humedad del suelo, utilizando los platos de presión, Modelo 1600F1 5 Bar y Modelo 1500F2 15 Bar plato cerámico extractor, marca Soil Moisture Equipment Corp. Las muestras de suelo se sometieron a presiones de 3, 6, 9, 50, 100 y 150 metros de agua (m.ca). Se determinó el porcentaje de humedad disponible (p) y eficiencia del uso del agua de cada tratamiento de las cuatro estaciones del año.

3.3.3 Tratamientos y diseño estadístico

Los tratamientos aplicados para obtener los coeficientes de riego fueron en función de la gradiente de la evapotranspiración potencial (ET_o): 100% ET_o, 80% ET_o, 60 % ET_o y 40 % ET_o, durante las cuatro estaciones del año. Para el cálculo de la lámina a regar o aplicar se utilizaron los valores de ET_o diarios acumulados obtenidos de la estación automática; la frecuencia de riego fue variable, la cual dependió de la estación climática, fue a nivel diario en los meses de verano, cada cinco a siete días en los meses de invierno y de dos a tres días en otoño y primavera.

Se utilizó un diseño estadístico completamente al azar, con cuatro tratamientos y tres repeticiones; cada repetición / tratamiento ocupó un área de 3.84 m², se evaluó el peso fresco y seco de biomasa de las hojas y tallos. Las variables se sometieron al análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey ($p < = 0.05$), se utilizó el programa Info Stat versión 2008.

3.3.4 Monitoreo del sistema de riego por goteo subterráneo

Para el monitoreo de los caudales de los goteros, se instaló válvulas volumétricas a nivel de subunidades de riego, lo que permitió registrar los excesos de agua aplicada, debido a una rotura o desconexión de mangueras, o falta de agua debido a una obstrucción de goteros por el ingreso de raíces o del suelo. Con la finalidad de detectar el mal funcionamiento en forma inmediata, se comparó las láminas teóricas que fueron obtenidas a partir de la evapotranspiración con las láminas aplicadas a cada tratamiento, mediante las lecturas de las válvulas antes y después de cada riego. Adicionalmente se controló la presión en la subunidad de riego para que trabaje entre 10 a 15 m.c.a.

La uniformidad de riego se evaluó mediante la distribución de uniformidad del cuarto inferior en base a la humedad volumétrica del suelo; se utilizó TDR 350, con sondeos a 7,5 cm de profundidad. La topología del RGS, a nivel de la subunidad de riego, fue anillada, lo que facilitó el lavado de los laterales enterrados.

3.3.5 Proceso de análisis jerárquico (PAJ) y coeficientes de riego

Se utilizó el PAJ para resolver el problema de obtener el coeficiente de riego para cada estación climática, con la mínima lámina de riego debido a la escasez del agua, el mínimo mantenimiento y obtener una calidad adecuada del césped. El objetivo fue seleccionar el mejor coeficiente de riego de cada estación del año, los criterios utilizados fueron los siguientes: a) Láminas de riego por tratamiento, b) Eficiencia en el uso del agua (EUA) relacionado con el menor mantenimiento, como el menor corte y traslado de materia seca para tener menos costos operativos y c) Calidad del césped, el cual involucra color, uniformidad y cobertura. Las alternativas del modelo fueron los tratamientos: 1,0 ETo, 0,8 ETo, 0,6 ETo y 0,4 ETo.

Las láminas de riego fueron las ETo acumulada, multiplicadas por los coeficientes de riego según su tratamiento. La poda del césped fue mensual, con alturas de hoja en un rango de 4 a 8 cm, en muestras de 2,1 m x 0,4 m, para determinar la materia fresca y seca, a fin de evaluar la EUA para cada tratamiento.

Se evaluó la calidad del césped en función del color, uniformidad y cobertura, en forma visual inicialmente. Para la cobertura verde (cv) se asignó una valoración:

- (3) para una cv mayor del 90 %,
- (2) para una cv entre 50 - 90 % y
- (1) para una cv menor del 50 %;

En la valoración del color se calificó como:

- (3) color verde con crecimiento activo,
- (2) descolorado con presencia de manchas marrones o amarillas y
- (1) color marrón y amarillo.

Fueron utilizadas las imágenes digitales y el programa Fiji V.2, para verificar los porcentajes de cobertura verde y color.

Para determinar la uniformidad (color y altura) se asignó la siguiente valoración:

- (3) para la uniformidad mayor del 90 % del área,
- (2) para la uniformidad entre 50 - 90 % del área y
- (1) para la uniformidad menor del 50 %.

La suma de las tres valoraciones representa la calidad del césped.

Un resumen de los pasos ejecutados para aplicar el PAJ (Saaty 2008) fueron los siguientes:

- a) Identificación del problema y definición del objetivo.
- b) Identificación de criterios, alternativas y desarrollo del árbol de jerarquías.
- c) Establecimiento de prioridades mediante comparaciones por pares para los criterios y alternativas.
- d) Emisión de juicios y evaluaciones: mediante asignación de pesos y ranking de alternativas en función de los pesos dados (desarrollo de matriz de comparaciones pareadas).
- e) Síntesis y análisis, se calculó de la prioridad de cada uno de los elementos que se compararon y se estableció la matriz de prioridades globales para obtener la solución general, estableciendo el orden desde la mejor alternativa a la peor y se calculó la consistencia de las matrices.
- f) Obtención de los coeficientes de riego para cada estación del año.

3.4 COEFICIENTE DE RIEGO DEL CÉSPED AMERICANO, UTILIZANDO ASPERSIÓN

Se determino los coeficientes de riego del año 2016-2017 en las condiciones reales del manejo del sistema de riego por aspersión, durante el periodo de evaluación se procedió de la siguiente manera:

- a) Se midió los volúmenes de agua aplicados a cada turnos mediante la válvula volumétrica instalada en el cabezal de riego, marca Raphael de 6” y posteriormente se acumuló a nivel mensual.
- b) Se calculó el área verde urbana de riego por aspersión que se actualizo y transcribió en los planos de AutoCAD, el área promedio fue de 15.2 ha.
- c) Utilizando los volúmenes brutos aplicados mensuales y las áreas de los turnos de riego, se determinó la lámina bruta/aplicada.
- d) La estación meteorológica automática con intervalo de registro a nivel horario, proporciono los datos de evapotranspiración potencial, que posteriormente fueron acumulados a nivel diario y mensual.
- e) Se determinó la eficiencia promedio inicial del sistema de riego, obtenida de las evaluaciones de campo utilizando el coeficiente de distribución de uniformidad en las áreas donde se instalaron los rotores. Se considero las horas más favorables para realizar el riego en función de las variables climáticas.
- f) En base a la evapotranspiración potencial (ET_o), la lámina bruta aplicada (L_b) y la eficiencia de riego inicial (E_r), se determinó el coeficiente de riego (CR) a nivel mensual para el periodo de evaluación de un año, utilizando la siguiente ecuación.

$$E_r = L_n / L_b = (ET_o * CR) / L_b$$

$$CR = (E_r * L_b) / E_{to}$$

3.5 COEFICIENTE DEL CULTIVO (KC)

Los principales componentes del sistema utilizados para la obtención de las variables del balance hídrico y los coeficientes del cultivo de césped fueron los siguientes: sistema de riego por difusores, lisímetro de drenaje, estación meteorológica automática y sensores de humedad que se describen a continuación. El periodo de evaluación fue de un año y se realizó el mantenimiento del césped, la operación y mantenimiento de los componentes del sistema mencionado.

3.5.1 Estación meteorológica automática Davis Pro Advantage

La estación meteorológica automática se instaló y registro las siguientes variables climáticas: Temperatura, horas de sol, vientos, humedad relativa, precipitación y la ETo con intervalos horarios, utilizando la fórmula de Penman Montheith, posteriormente se calcularon las variables climáticas y ETo a niveles diarios y mensuales.

3.5.2 Sistema de riego de difusores

Compuesto por una cisterna, caseta de bombeo, el cabezal de riego y el sistema de riego por aspersión utilizando cuatro difusores por lisímetro (2) de la marca Rain Bird serie 1800 de 1/2" boquilla regulable 4 VAN, con un radio de 1.2 m, fue utilizado para aplicar las láminas de riego. Además, se instalaron válvulas volumétricas de medición del agua y puntos de prueba para la medición y control de presión.

3.5.3 Sensores de humedad

Se utilizaron sensores con principios de medición en base a la conductividad eléctrica (watermark), instalados a 12 cm de profundidad, en el volumen de control del lisímetro. La humedad se registraba antes del riego y 6 horas después del riego, para realizar los balances hídricos en el suelo.

3.5.4 Lisímetro

Se utilizó un lisímetro de drenaje, como se presenta en la Figura 29, que permitió monitorear la humedad del suelo y medir el drenaje del balance hídrico de este volumen de control, luego de 6 horas de la aplicación del riego.

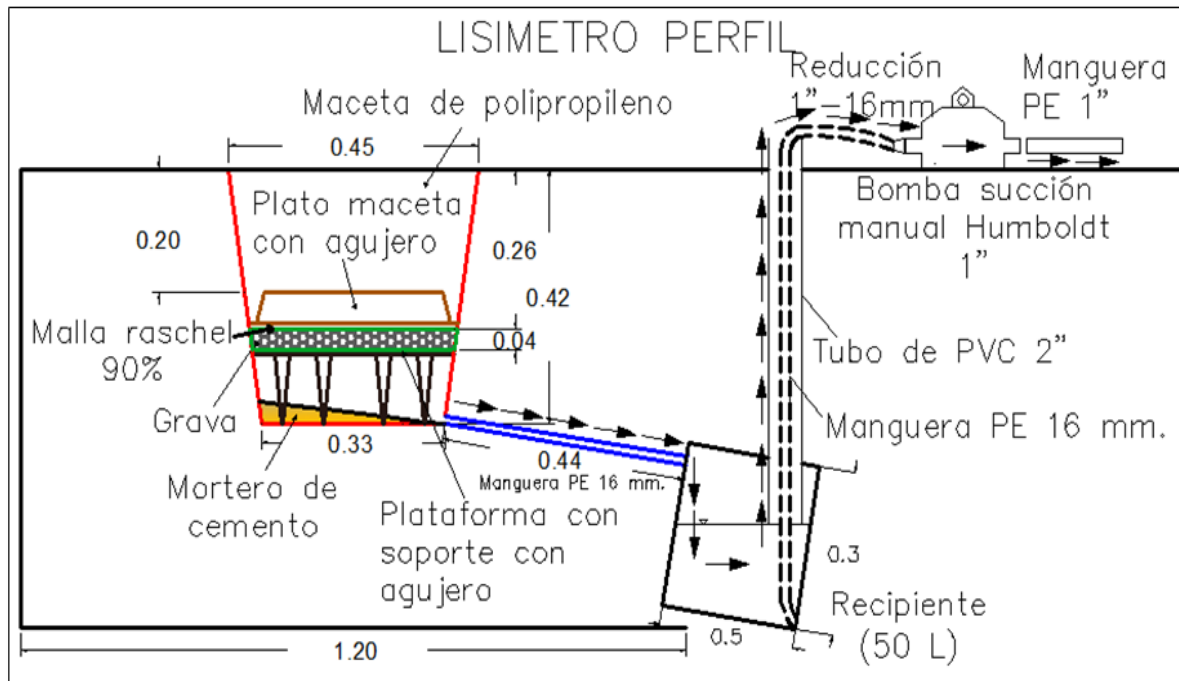


Figura 29: Lisímetro de drenaje.

Fuente : Padilla Soldevilla (2016)

3.5.5 Variables del balance hídrico en el suelo y k_c del césped

Para el cálculo del coeficiente del cultivo (K_c) se utilizó la ecuación del balance hídrico en el suelo, que se presenta a continuación:

$$R + P_p = ETC + D \pm \Delta SW$$

Se midió las siguientes variables: Lamina de riego (R), precipitación (P_p), agua drenada (D) y la variación de humedad en el suelo (ΔSW), para posteriormente obtener la evapotranspiración del cultivo (ET_c), que fue despejada de la formula anterior porque era la única incógnita y finalmente en base a la relación $ET_c = ET_o * K_c$, se obtuvo los valores de los coeficientes del cultivo (k_c).

A continuación, se describe la obtención de las variables del balance.

a) Evapotranspiración potencial (ET_o)

La ET_o se calculó utilizando la ecuación de Penman – Monteith, con la estación automática Davis. La consola fue configurada con ayuda del software Weather Link, con los datos básicos requeridos como la latitud, la longitud, la elevación; y para el monitoreo se fijó un intervalo de medición de 60 minutos para el almacenamiento de datos, la hora y las unidades de medición.

b) Las láminas de riego (R)

La lámina por reponer se basó en la ETo obtenidas de la estación automática Davis. La lámina aplicada es la suma de la ETo acumulada de 2 días en verano y en invierno hasta 10 días, a esta lámina acumulada se adicionó entre un 30 a 50 % de la ETo para garantizar el drenaje en el lisímetro. El riego se realizó entre las 9 y 10 de la mañana para evitar el problema del excesivo viento, porque se utilizó difusores para el riego del césped instalado en el lisímetro. La velocidad de aplicación utilizada por los difusores fue obtenida de las pruebas de uniformidad realizada en el área real (área superficial del volumen de control) de los lisímetros (2).

c) Precipitación (Pp)

Esta variable fue monitoreada por la estación meteorológica automática siendo insignificante, con un valor menor de 10 mm durante todo el año.

d) Drenaje (D)

El agua drenada fue expresada mm, se cuantificó con el lisímetro de drenaje, se almacenó y midió para cada balance, después de cada riego luego de 6-8 horas, este tiempo permitió la distribución del agua a través del perfil suelo del volumen de control. Los volúmenes de agua drenada que se monitorearon fueron variables y dependieron de la humedad del suelo, evapotranspiración del cultivo y las láminas de riego aplicadas que fueron entre 1.3 a 1.5 de las ETo acumuladas. Los volúmenes drenados divididos entre el área promedio del volumen de control del lisímetro, permitió obtener la lámina drenada.

e) Variación de humedad en el suelo (ΔSW)

La ΔSW fue determinada utilizando el sensor de humedad (watermark) previamente calibrado en base al método gravimétrico, se relacionó la humedad del suelo y las lecturas de la energía de retención del agua en el suelo expresada en centibares, la variación humedad del suelo se transformaron en milímetros de agua utilizando la curva de calibración. Las lecturas en los sensores se realizaron antes del riego y 6-8 horas después del riego, para obtener la variación de humedad en cada balance. Las variaciones de humedad registradas deberán estar alrededor de capacidad de campo, para garantizar la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar, es decir condiciones óptimas de humedad y que la planta se encuentre libre de enfermedades y plagas.

- f) Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc)

La única variable desconocida en la ecuación de balance hídrico en el suelo fue la ETc, la cual se obtuvo por despeje de la ecuación de balance.

$$ETc = R + P - D - \Delta SW$$

Todas las variables fueron acumuladas para cada balance y expresadas en mm.

- g) Coeficiente de cultivo (kc)

Los coeficientes de cultivo del césped americano se calcularon con los valores de ETc obtenidos de la ecuación de balance y la ETo fue obtenido de la estación automática Davis para periodos variables, finalmente para la obtención del valor de los Kc se utilizó la siguiente ecuación:

$$Kc = ETc / ETo$$

3.6 SELECCIÓN DE PLANTAS Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS SEGÚN SU USO

3.6.1 Identificación y coeficientes de especies de plantas (Ks)

- a) Se identificaron las especies de plantas existentes en las áreas verde urbanas de la UNALM.
- b) Para obtener los coeficientes de la especie de las plantas, se utilizó la zonificación de la evapotranspiración de referencia (Eto) del estado de California, desarrolladas por Irrigation Management Information System (CIMIS), se identificaron 18 zonas con diferentes comportamientos de la ETo agrupadas en 6 regiones. Adicionalmente se calculó la evapotranspiración de referencia de la estación Alexander Von Humboldt en la UNALM, para un periodo de 15 años (2000 -2015).
- c) Se compararon en forma gráfica los valores de la ETo de la UNALM y la ETo de las seis regiones desarrolladas por el CIMIS, para determinar la región del estado de California con valores de Eto similares y que presenten el mismo comportamiento mensual, a los valores de ETo de la UNALM. Con el fin de ser objetivo para la selección de la región del estado de California que presente valores similares a la UNALM, se realizó la comparación estadísticamente, mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Una vez seleccionada la región que presente el menor

valor de RMSE, y se procedió a seleccionar los valores de Ks registradas en Water Use Classifications of Landscape Species (WUCOLS) de la región seleccionada.

- d) Para la selección del coeficiente de especies nativas del Perú y árboles frutales, se obtuvo el coeficiente de especie en base a consultas de especialistas en riego y al Manual 56 de la FAO.

3.6.2 Selección de especies de plantas

Las áreas verdes de la UNALM están establecidas y alrededor del 90 % del área está sembrada con césped americano y el 10 % restante con árboles forestales y arbustos. A continuación, se presenta los principales criterios para la selección de los árboles frutales o forestales, césped y cubre suelos, a ser incorporados para disminuir el requerimiento de agua por parte de las plantas, brindar confort al usuario y tener una adecuada calidad visual.

- a) Bajo requerimiento de agua del césped o cubre suelos y resistente a la sequía.
- b) Árboles frutales o forestales de zonas áridas.
- c) Césped con alta tolerancia a la sombra para realizar las asociaciones césped – árbol.
- d) Tipo de copa de los árboles.
- e) Preferencias estéticas por los usuarios, para la selección de plantas.

3.6.3 Coeficiente del paisaje y requerimiento de agua actual

Se presenta la secuencia de pasos para determinar el requerimiento de agua de las áreas verdes urbanas.

- a) Se determinó el coeficiente del jardín o paisaje (Kj) con la siguiente fórmula:

$$K_j = K_s * K_d * K_{mc}$$

Se seleccionó el coeficiente de especie (ks), en base a la categoría que pertenece cada especie de árbol, palmera, cubre suelo o césped, estas plantas fueron identificadas a nivel de válvula, se utilizó la Cuadro 1, correspondiente al factor de especie. Se realizó la comparación de ks entre el grupo de cobertura de cubre suelo,

césped, árbol y/o palmera, para finalmente se asignar el mayor valor de ks para cada válvula de riego en base a la cobertura verde.

Se seleccionó el coeficiente de densidad, en base a la categoría que corresponda, observando la distribución de plantas que ocupan el área de cada válvula, se utilizó la Cuadro 2, correspondiente al factor de densidad.

Se seleccionó el coeficiente de microclima, en base a la categoría que corresponda observando la presencia de árboles, edificios o pistas presentes, se utilizó la Cuadro 3, correspondiente al factor de microclima.

- b) La demanda de agua se determinó en base a la ETj que es el producto de la ETo y el coeficiente del jardín (KJ) para cada válvula de riego. La suma de los requerimientos de agua por válvulas se determinó la demanda total.

Se utilizó la siguiente formula:

$$ET_j = E_{To} * K_j$$

3.6.4 Zonificación de áreas verdes según el uso

Se zonificó las áreas en función al tipo de uso, como paisajista o utilitario, o ambos con predominancia de uno de ellos. En la situación actual de las áreas verdes urbanas se propuso realizar cambios paulatinos de las coberturas del paisaje en función al tipo de uso, con el fin de seguir brindar los servicios al usuario, pero disminuyendo los requerimientos hídricos de las plantas e incorporando el uso productivo de las plantas, mediante la siembra de árboles frutales.

3.6.5 Evaluación hidráulica de las subunidades de riego

- a) Se realizó el diseño de la subunidad de riego por aspersión y goteo representativa para presentar el proceso de diseño, utilizando los criterios hidráulicos presentados en la revisión de literatura con el objeto de obtener altas distribuciones de uniformidad y garantizar la presión y caudal requerido en la válvula, se utilizó el Programa EPANET.
- b) Se realizó la comparación de requerimientos de presión cuando se utiliza aspersión y goteo, para evaluar su efecto en el ahorro energético y finalmente se calculó el requerimiento de lavado para el riego por goteo subsuperficial.

3.6.6 Evaluación de la distribución de la uniformidad y eficiencia de riego

a) Se evaluó la DU del sistema por aspersión instalado con la siguiente fórmula:

$$DU = (q_{25} / q_m) * 100$$

q_m = Volumen o humedad media de la muestra de emisores operados la presión de referencia de la subunidad de riego.

q_{25} = Volumen o humedad medio del 25 % de los emisores de menor volumen o humedad de la subunidad de riego.

Se evaluó la DU en base a:

- Volúmenes o láminas es un método convencional, que permitió evaluar la calidad del diseño y estado de la subunidad de riego en el momento de evaluación (Darko *et al.* 2017)
- Humedad del suelo, utilizando el muestreador de humedad TDR, que permitió evaluar la distribución del agua en el perfil del suelo luego del riego (Darko *et al.* 2017).

b) Se evaluó la eficiencia de aplicación (E_r) del sistema presurizado con la siguiente fórmula:

$$E_r = DU * (1 - K)$$

$$K = P_p$$

$$K = RL$$

P_p = Percolación profunda en decimales.

RL = Requerimiento de lavado para riego por goteo o aspersión en decimales.

Para los siguientes escenarios:

- Irrigación deseada, cuando se aplicó la lámina recomendada,
- Sub irrigación, cuando existió déficit de lámina de agua aplicada, y
- Sobre irrigación, cuando existió una percolación debido a un exceso de lámina.

Se evaluó la eficiencia de riego del sistema de riego por aspersión en operación a nivel mensual durante el año 2016 – 2017, la eficiencia fue calculada en base a la evapotranspiración potencial mensual, considerando los coeficientes del cultivo obtenidos con el lisímetro y los volúmenes medidos en el cabezal mediante una válvula volumétrica del sistema de riego.

3.6.7 Escenarios de balances hídricos

Se calcularon los requerimientos y balances hídricos de los siguientes escenarios:

- a) Riego por gravedad por inundación.
- b) Riego por aspersión 1 (situación inicial), automatizado y presurizado por bombas.
- c) Riego por aspersión 2, evaluación de DU de los emisores, automatizado y presurizado por bombas
- d) Riego por aspersión 3, evaluación de DU, automatizado y telecontrol, presurizado por bombas.
- e) Riego por aspersión y goteo subterráneo (propuesta), evaluación de DU, automatizado y telecontrol, presurizado por bombas.
- f) Riego por goteo subterráneo (propuesta), evaluación de DU, automatizado y telecontrol, presurizado por bombas.

Para los diferentes escenarios se consideraron los sistemas de riego por gravedad, aspersión y goteo subsuperficial, nuevas propuestas de las plantas, manejo del césped bajo estrés, tapizantes de bajo requerimiento hídrico, arboles forestales y frutales, cambio de zonificación, reducción de las áreas de césped, se utilizaron las distribuciones de uniformidad evaluados y las eficiencias de riego deseadas, reservorios, automatizaciones, telecontrol usando la nube IQ Cloud.

3.7 EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EMISIONES PRODUCIDAS DE CO₂ EN LOS SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADOS

Los sistemas de riego presurizados producen gases de invernadero y contribuyen a la emisión de CO₂ debido al uso de motores eléctricos, cuya fuente energética no proviene solamente de una hidroeléctrica, sino también de unas centrales térmicas conectadas al sistema interconectado nacional, La mayoría de los proyectos de riego presurizado no toma en cuenta este aspecto, porque solo se evalúa la eficiencia hídrica y no la eficiencia energética y la cuantificación de la emisión de CO₂ que contribuye al cambio climático. En el sistema de riego presurizado en las áreas verdes urbanas de la UNALM, además de

evaluar la eficiencia de riego, se evaluó la eficiencia energética y las emisiones de CO₂ producido por la estación de bombeo, para los siguientes escenarios:

- a) Situación presente, con el paisaje actual y sin variador de frecuencia
- b) Situación mejorada, con cambio de paisaje utilizando con plantas de bajo o medio requerimiento de agua o bajo estrés controlado, lo que implica menores volúmenes de agua, tiempos de riego y energía, utilizando variadores de frecuencia.

3.7.1 Operación del sistema

- a) Se definió la programación de riego en base al clima, se utilizó los datos proporcionados por la estación automática agroclimática Davis y la operación del sistema de riego considerando: número de válvulas por turno de riego, la lámina a reponer, velocidad del emisor, tiempo de riego. La lamina a reponer está basada en la evapotranspiración potencial obtenidos por la estación automática Davis y los K_j de las plantas de mayor demanda.
- b) Para completar el ciclo de riego diario se utilizaron dos controladores ESP-LXD y ESP-LXME, para la operación de los 30 turnos de riego y 106 electroválvulas, la conformación de los turnos de riego con la agrupación de las válvulas entre 3 y 4 por turno, el cual depende del caudal, altura dinámica total y eficiencia de la bomba. Se utilizaron los rotores o difusores con velocidades de aplicación iguales o similares por turno y el modelo de emisor seleccionado estuvo en función de las dimensiones del área a regar,

3.7.2 Cálculo de la eficiencia energética y emisiones de CO₂, situación actual

Se realizaron los siguientes pasos:

- a) Se determinaron y presentaron las curvas de altura dinámica total (ADT), eficiencia de la bomba, potencia de la bomba tipo turbina de eje vertical. Se plotearon los puntos de operación (ADT en m.c.a y caudal en l/s) de los 30 turnos de riego, conformados por 3 o 4 válvulas.
- b) Se calculó el requerimiento de la lámina de riego a reponer en función del K_j = 1, correspondiente al césped americano, el valor de la evapotranspiración potencial fue obtenida de la estación automática Davis, la eficiencia de riego de los rotores

utilizada fue del 75%, el costo de S/. 0.2 / kw-hr por la energía eléctrica y el área bajo riego corresponde a 15.2 ha.

- c) Se determinó la eficiencia de la bomba para cada turno de riego utilizando la gráfica o la curva polinómica obtenida. Se calculó la eficiencia del motor y la eficiencia energética total promedio, máximo y mínima del sistema de bombeo.
- d) Se calculó el costo energético total anual y costo por efecto de las sobrepresiones en cada turno de riego.
- e) Se calculó la emisión del CO₂ equivalente producido por las bombas, considerando el factor de emisión de energía eléctrica de 0.6593 Kg CO₂/ Kwh, correspondiente al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (Ministerio del Ambiente 2016).

3.7.3 Cálculo de la eficiencia energética y emisiones de CO₂, situación mejorada

Se realizó los siguientes pasos:

- a) Se desarrolló la familia de las curvas de altura dinámica total (ADT) y potencia de la bomba, utilizando las ecuaciones de afinidad para las diferentes velocidades del motor en rpm o Hertz (Hz).
- b) Se graficó las curvas de altura dinámica total (ADT), eficiencia de la bomba y potencias de la bomba turbina de eje vertical, para las diferentes velocidades del motor, considerando no bajar la velocidad máxima del motor en 30 % (1225 rpm o 42 Hz).
- c) Se plotearon los puntos de operación de la bomba, los valores de ADT y caudal de los 30 turnos de riego.
- d) Se seleccionó la curva de ADT más adecuada que cumpla los requerimientos de presión y caudal para cada turno de riego con la más alta eficiencia y menor sobrepresión de la bomba.
- e) Se calculó el requerimiento de la lámina de riego a reponer en función del $K_c = 0.8$ del césped americano y $K_c = 0.4$ del cubre suelo, el valor de la evapotranspiración potencial fue obtenida de la estación meteorológica automática, la eficiencia de riego de los rotores utilizada fue del 75% y de los difusores de 60 %. El costo energético fue de S/. 0.2 / kw-hr y el área bajo riego fue de 15.2 ha.
- f) Se determinó la eficiencia de la bomba para cada turno de riego utilizando a gráfica o la curva polinómica obtenida, además se obtuvo la eficiencia del motor y variador

de frecuencia para calcular la eficiencia energética total promedio, máximo y mínima del sistema de bombeo.

- g) Se cálculo del costo energético total anual y costo por efecto de las sobrepresiones en cada turno de riego y el total del sistema.
- h) Se cálculo la emisión del CO₂ producido por las bombas, considerando el factor de emisión de energía eléctrica de 0.6593 Kg CO₂/ Kwh, correspondiente al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (Ministerio del Ambiente 2016).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA

4.1.1 Descripción de los sistemas de riego

El sistema de riego por aspersión de las áreas verdes urbanas de la UNALM tiene los siguientes componentes:

- La unidad de bombeo cuenta con una electrobomba de eje vertical tipo turbina con una carga dinámica total de 70 metros, para un caudal de 23 l/s, una eficiencia máxima de 80 % y un motor trifásico de 440 voltios. En la Figura 30, se presenta la unidad de bombeo y reservorio.
- El cabezal está compuesto por un filtro automático (Filtomat), con una malla de 130 micrones y el sistema de fertilización es compuesto de un venturi, una unidad de bombeo independiente y una cisterna para los fertilizantes solubles, además de contar con válvulas de regulación y control como las válvulas volumétricas, sostenedoras de presión, de aire, de alivio, check, bola, mariposa, manómetros y transductores de presión. En la Figura 31 se presenta el cabezal de control.
- El sistema de automatización está compuesto por controladores, decodificadores, electroválvulas con reductores de presión y solenoides, la señal eléctrica e información es transmitida a través del mono cable.
- Las casetas y reservorios (2) están revestidos con geomembrana de polietileno de 1 mm de espesor, con una capacidad de 9500 m³ cada uno. En la Figura 32 se muestran las casetas y reservorios.
- La plataforma IQ Cloud Rain Bird es utilizada para el telecontrol del sistema, en la Figura 33 se presenta el sistema de automatización y telecontrol.
- 6500 emisores, entre rotores serie 3500, 5000, Falcon 6504, difusores de la serie VAN.

- 106 subunidades distribuidas en 15.2 ha, cada una está compuestas de electroválvulas modelo PGA 200 con un solenoide y reductor de presión.
- El sistema cuenta con 30 turnos de riego, cada turno agrupa de 3 o 4 válvulas. Red de tuberías de PVC con diámetros de 90 mm, 75mm y 63 mm, 2” 1.5 “.
- La red de tubería principal tiene 4 km con diámetros, 160 mm, 140 mm, 110 mm, 90 mm de clase 10 y la red de riego total contando la red interna de las subunidades tiene 42 kilómetros con diámetros de tuberías de PVC de 2”, 1.5” y 1”, clase 10. En la Figura 34, se presenta la red de riego.



Figura 30: Unidad de bombeo y reservorio.



Figura 31: Cabezal de control.



Figura 32: Casetas y reservorio, fotos tomadas desde un dron.

Actualmente, el uso de sensores, actuadores inteligentes, sistemas de comunicación, control remoto, monitoreo; y sistemas de posición global, se está convirtiendo en una necesidad en la agricultura moderna



Figura 33:Automatización y telecontrol Plataforma IQ Cloud Rain Bird.

RED HIDRAULICA Y VALVULAS

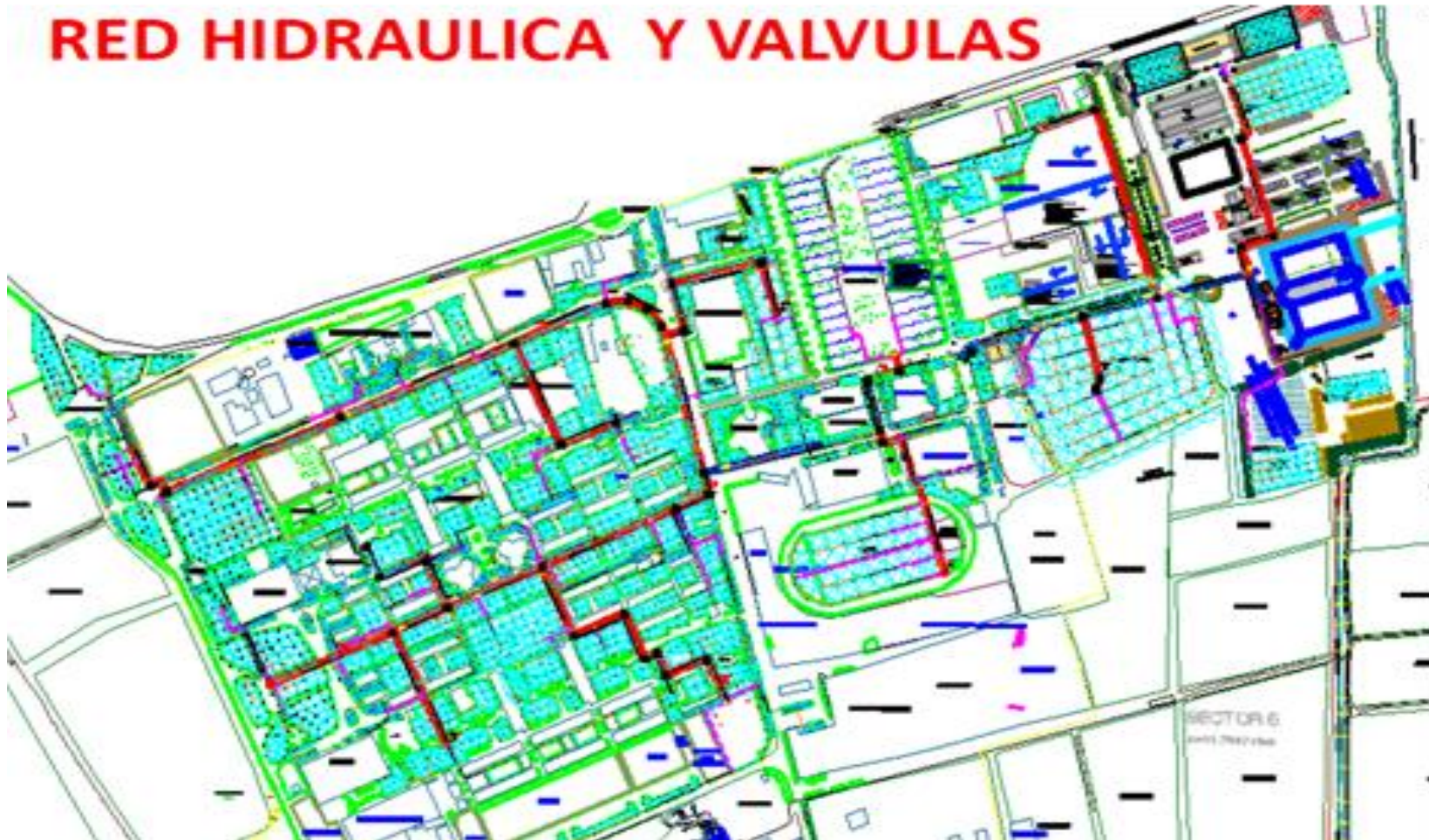


Figura 34: Red de tuberías y válvulas.

Los componentes del riego por goteo subterráneo RGS fueron los siguientes:

- Cisterna,
- Electrobomba,
- Cabezal de riego,
- Red de tuberías,
- Subunidades de riego compuestas por arcos de riego, porta laterales, líneas de laterales integrales y purgas.

En la Figura 35, se presenta el sistema de riego por goteo subterráneo.



Figura 35: Sistema de riego por goteo subterráneo.

Los laterales de goteo subterráneo tuvieron un diámetro de 17 mm (clase 4) y fueron enterrados a 10 cm de la superficie del suelo. Se utilizó un espaciamiento entre goteros de 0,3 m y un espaciamiento entre laterales de 0,4 m, para obtener un porcentaje de área mojada de 100 % en el suelo. El caudal del gotero auto compensado fue de 2,3 l/hr, de marca Rain Bird, modelo XFS, con escudo de cobre para evitar el ingreso de las raíces del

césped al gotero. El rango de presiones de trabajo del emisor fue de 5,8 a 41,4 m de agua y la velocidad de aplicación del gotero fue de 19,17 mm/hr.

Cada subunidad de riego (Unidad experimental) estuvo compuesta: por una válvula para la apertura o cierre, una válvula de aire para evitar que los goteros succionen aire y/o partículas de suelo durante el vaciado de los laterales, un rociador que indica la presurización de la subunidad, un punto de control de presión, los laterales con los goteros integrales y una porta lateral. La presurización del sistema fue realizada mediante el uso de una electrobomba con un caudal de 0,4 l/s y 20 metros de altura dinámica total, abastecida por una cisterna de capacidad de 1100 litros, que está conectada a la red tuberías del sistema de riego principal que abastece de agua a las 15.2 ha de áreas verdes urbanas de la UNALM, que utiliza riego por aspersión.

Para el monitoreo de los caudales de la subunidad y los goteros, se instalaron válvulas volumétricas en la entrada de subunidades de riego, permitiendo registrar los excesos de agua aplicada, debido a una rotura o desconexión de mangueras, o falta de agua debido a una obstrucción de goteros por el ingreso de raíces o partículas del suelo. Con la finalidad de detectar el mal funcionamiento en forma inmediata, se comparó las láminas teóricas que fueron obtenidas a partir de la evapotranspiración con las láminas aplicadas a cada tratamiento, mediante las lecturas de las válvulas antes y después del riego. Adicionalmente se controló la presión en el rango de 10 a 15 metros. La uniformidad de riego se evaluó mediante el coeficiente de distribución de uniformidad del cuarto inferior en base a la humedad volumétrica del suelo; se utilizó TDR 350, con sondeos a 7,5 cm de profundidad. La topología del RGS, a nivel de la subunidad de riego, fue anillada. En la Figura 35 se presenta el RGS y en la Figura 36, presenta los equipos y materiales más relevantes utilizados en la investigación.

4.1.2 Variables climáticas y evapotranspiración potencial

Las variables climáticas y evapotranspiración fueron monitoreadas a nivel horario desde agosto del 2016 a julio del 2017 utilizando la estación meteorológica automática Davis Vantage Pro2. Las variables monitoreadas fueron las siguientes: Evapotranspiración potencial, radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, lo que permitió la obtención de curvas características del comportamiento de cada variable a nivel

diario que se presentan en las Figuras 37,38,39,40 y 41, y en la Cuadro 5, se presentan los promedios mensuales de la evapotranspiración potencial y las variables climáticas, en el Anexo1, se presentan la variación diaria de las variables.

La evapotranspiración potencial presento un valor mínimo de 0.96 mm/día en el mes de agosto, un valor máximo 3.84 mm / día en el mes de marzo, y un valor promedio anual de 2.4 mm/día, la relación entre los valores máximo y el mínimo mensual de evapotranspiración es 4, presentando una proporción de mayor requerimiento de agua en el mes de marzo con respecto a agosto.

La radiación solar presento un valor mínimo de 2.54 Mj m²/día en el mes de junio, y un valor máximo de 8.05 Mj m²/día en el mes de marzo, y un valor promedio anual de 5.3 Mj m²/día. La curva de radiación solar y la evapotranspiración potencial presentaron el mismo comportamiento durante todo el año como se presenta en las Figuras 37 y 38.

La temperatura presento un valor mínimo de 15.96 °C en el mes de agosto, un valor máximo 25.53 °C en el mes de febrero, y un valor promedio anual de 20.74 °C, la variación diaria de temperatura presentó valores máximos de 28 °C en verano y mínimos de 14 °C en invierno.

La humedad relativa presento un valor mínimo de 74.84 % el mes de febrero, un valor máximo 91,86 % en el mes de agosto, y un valor promedio anual de 83.35 %, se presentaron días en invierno que alcanzan el 98 %.

La velocidad del viento presento un valor mínimo de 1.03 m/s en el mes de febrero, un valor máximo 1,35 m/s en el mes de octubre, y un valor promedio anual de 1,19 m/s.



Figura 36: a) Sistema de riego por goteo subterráneo y tratamientos b) Estación automática Davis c) Ollas y platos de presión d) Sensor FDR e) Sensor TDR.

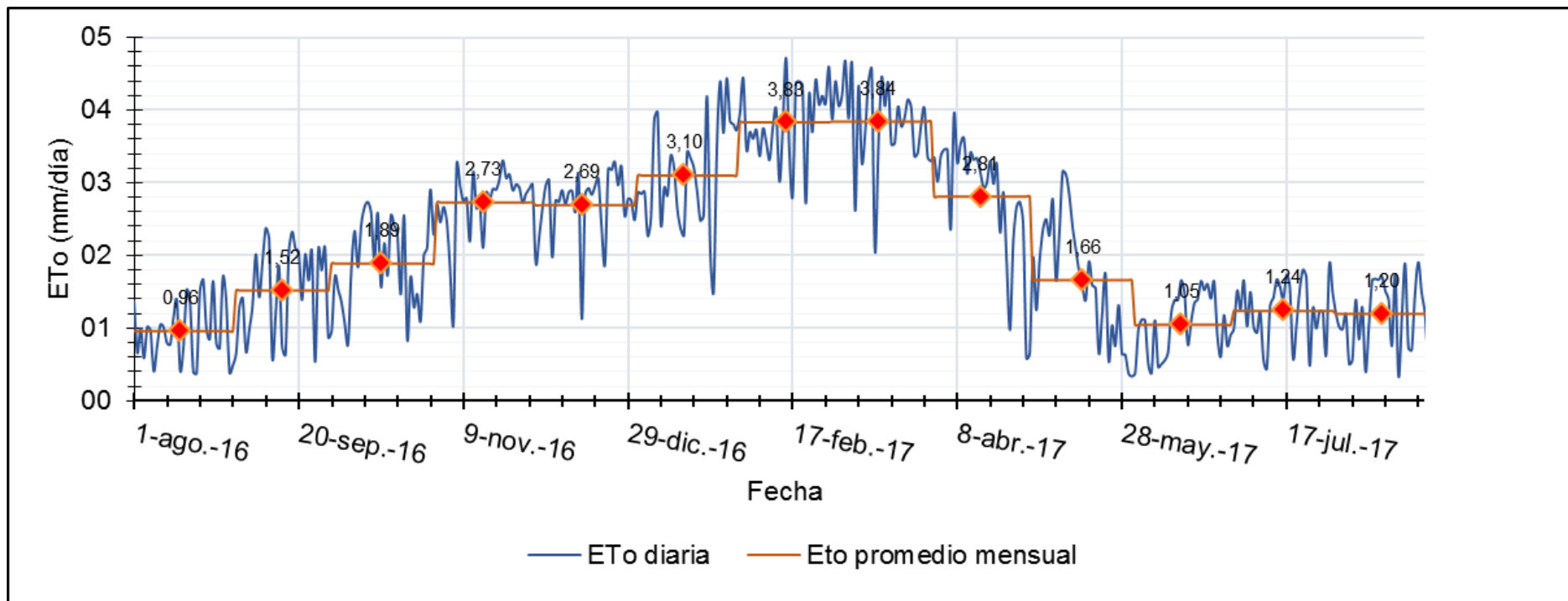


Figura 37: Evapotranspiración potencial mensual y diaria.

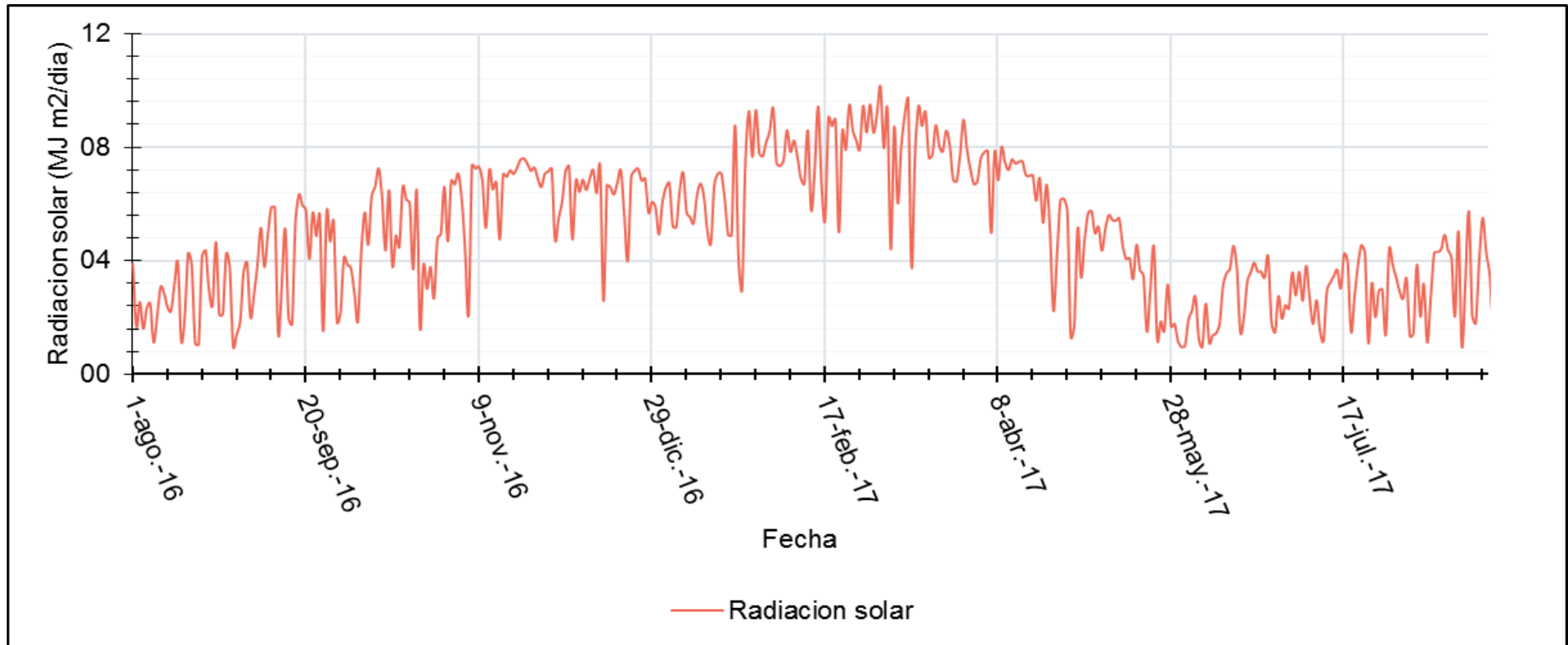


Figura 38: Radiación solar diaria.

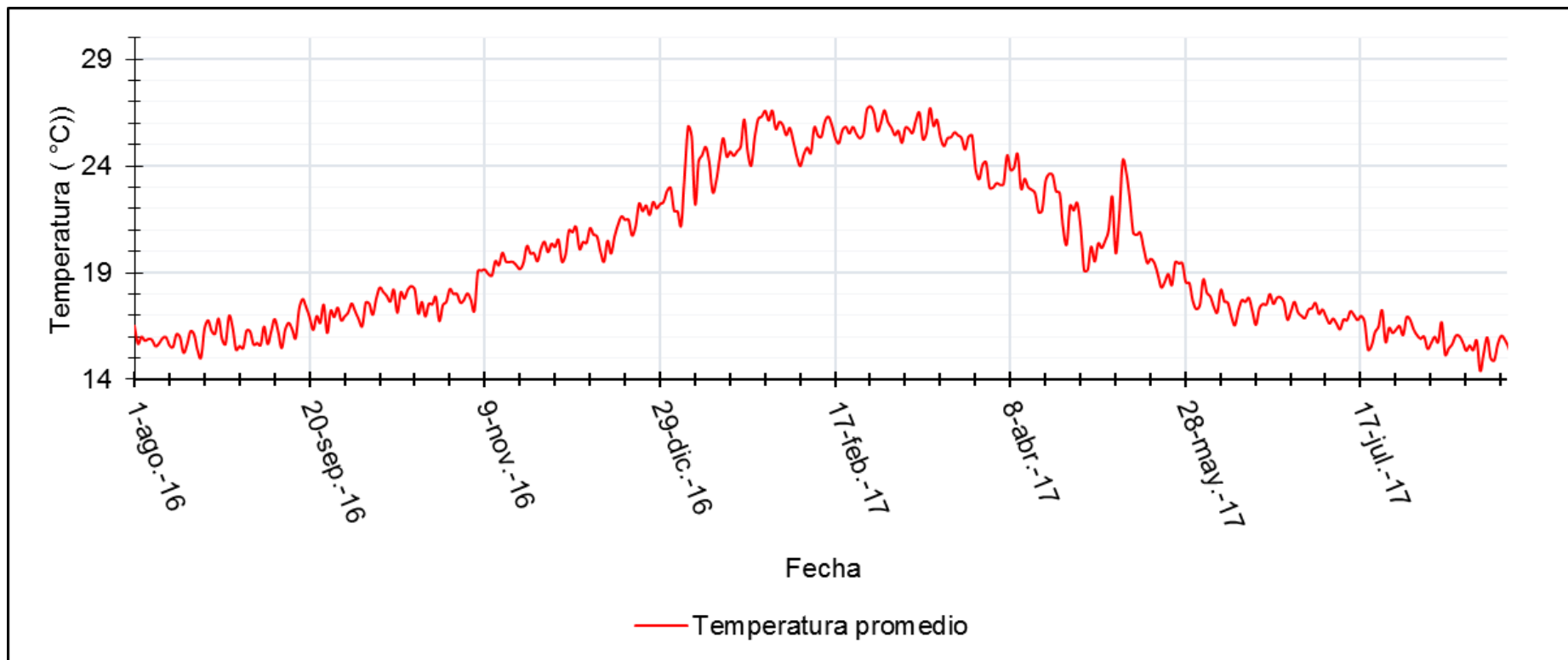


Figura 39: Temperatura diaria.

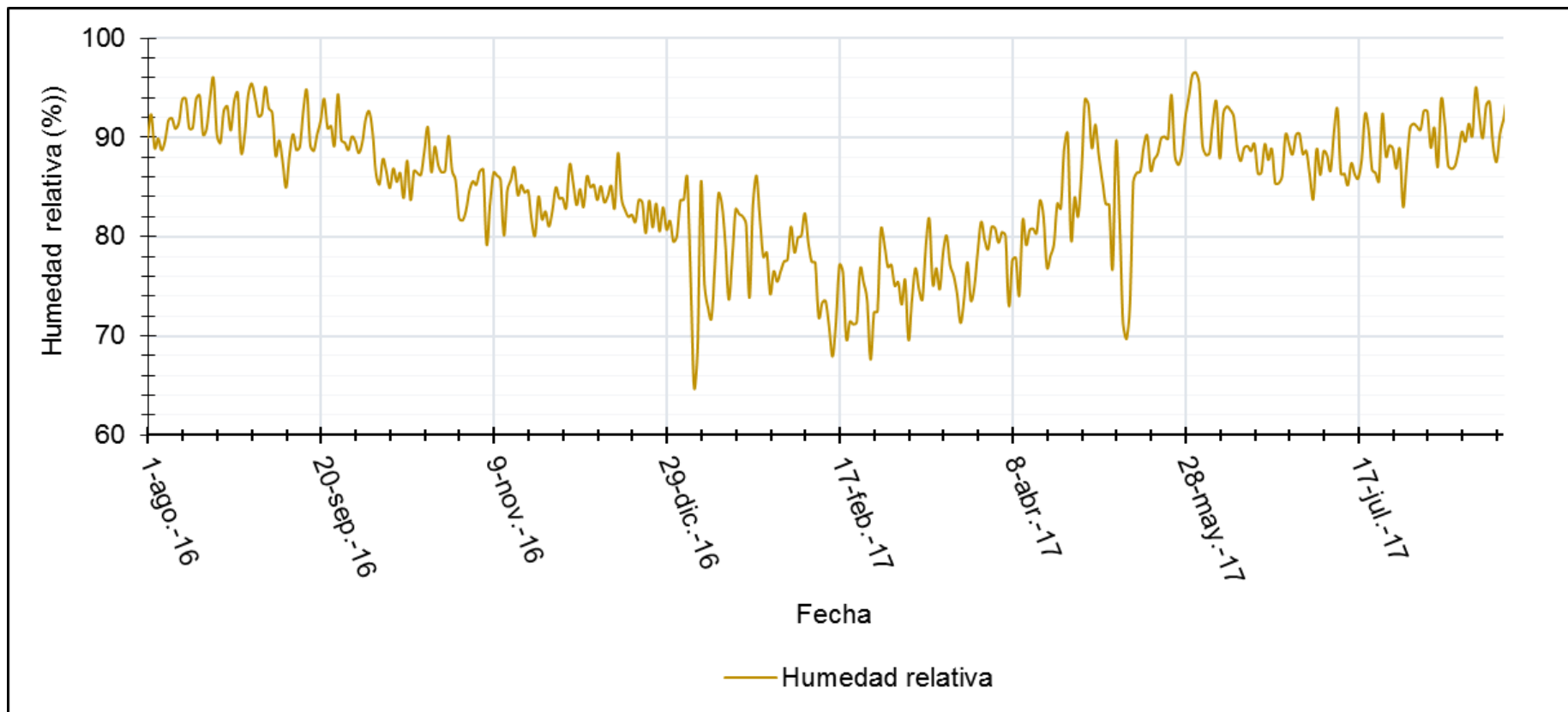


Figura 40: Humedad relativa diaria.

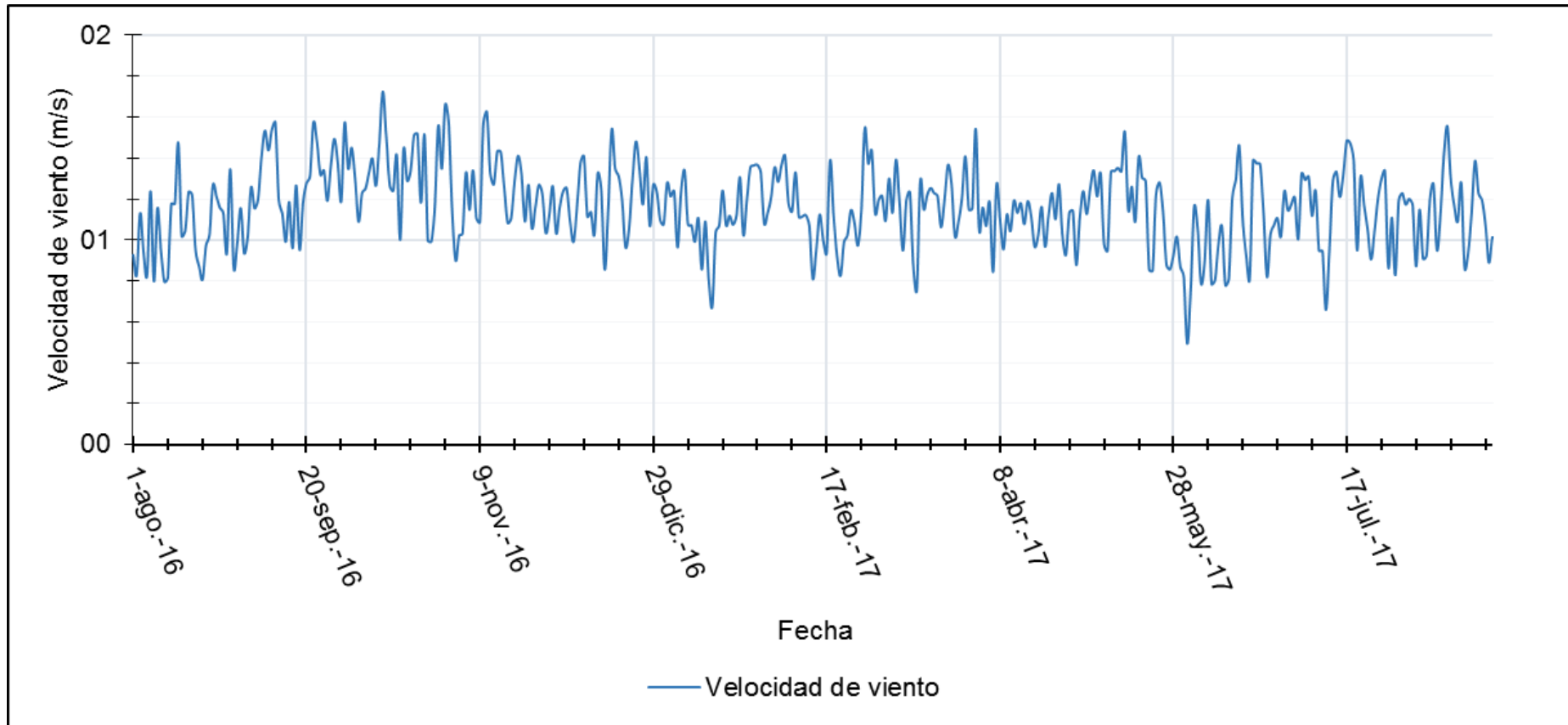


Figura 41: Velocidad del viento diario.

Cuadro 5: Promedios mensuales de la evapotranspiración potencial y las variables climáticas.

Mes	Temperatura (°C)	Velocidad viento (m/s)	H. Relativa (%)	Rad. Solar (MJ m ² /día)	ETo (mm/día)
Agosto	15.96	1.04	91.86	2.63	0.96
Septiembre	16.51	1.27	90.73	4.12	1.52
Octubre	17.60	1.35	87.15	4.63	1.89
Noviembre	19.27	1.22	83.92	6.65	2.73
Diciembre	21.09	1.20	83.41	6.22	2.69
Enero	24.49	1.12	78.58	6.40	3,1
Febrero	25.53	1.13	74.84	7.89	3.83
Marzo	25.46	1.18	76.32	8.05	3.84
Abril	22.60	1.10	81.68	6.24	2.81
Mayo	20.04	1.15	86.79	3.74	1.66
Junio	17.50	1.03	89.41	2.54	1.05
Julio	16.69	1.15	87.77	2.95	1.24
Maxima	25.53	1.35	91.86	8.05	3.84
Minima	15.96	1.03	74.84	2.54	0.96
Promedio	20.23	1.16	84.37	5.17	2.20

En las Figuras 42,43,44,45 y 46 se presentan el comportamiento horario de las variables: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y evapotranspiración potencial, lo que permitió la obtención de curvas características del comportamiento de cada variable a nivel horario para cada mes del año, para definir las horas adecuadas para regar con el sistema de riego por aspersión.

La variación horaria de la evapotranspiración potencial presenta los mayores valores entre las 10 am y las 6 pm, se recomienda no regar en este periodo para evitar las pérdidas durante todos los meses del año, así mismo se observa que la evapotranspiración es significativa a partir de las 8 de la mañana hasta las 8 de la noche. La variación horaria de la radiación solar presenta un comportamiento similar a la evapotranspiración potencial.

La variación horaria de la temperatura presenta los mayores valores entre las 10 am a las 6 pm, se recomienda no regar en este periodo para evitar las pérdidas por evaporación durante todos los meses del año, así mismo se observa que la temperatura crece a partir de las 8 am hasta las 12 am, se mantiene constante hasta las 4 de la tarde, y luego decrece hasta las 8 de la noche, para mantenerse prácticamente constante.

La variación horaria de la humedad relativa presenta los menores valores entre las 12 am a las 6 pm, no debiendo regarse en este periodo para evitar las pérdidas por evaporación durante todos los meses del año, así mismo se observa que la humedad relativa incrementa partir de las 6 pm, hasta alcanzar los máximos alrededor de las 6 am.

La variación horaria de la velocidad del viento presenta los mayores valores entre las 12 pm hasta las 6 pm, no debiendo regarse en este periodo para evitar las pérdidas por evaporación y arrastre por efecto del viento durante todos los meses del año, así mismo se observa que la velocidad del viento crece a partir de las 8 am hasta la 1 pm, se mantiene casi constante hasta las 4 de la tarde, y luego decrece hasta las 8 de la noche, para mantenerse prácticamente constante.

Debido al comportamiento diario de las variables climáticas, se observa que el mejor horario para el riego por aspersión es a partir de las 6 pm hasta las 8 am. Sin embargo, se deberá utilizar el sistema de riego durante parte del día para detectar posibles fallas de calibración, roturas o robos en los rotores, limpieza y labores académicas. Si consideramos el pago de la tarifa eléctrica en horas punta, el horario a utilizar el sistema de riego sería entre las 11pm a las 8 am.

Figura 42: Variación horaria de la evapotranspiración potencial.

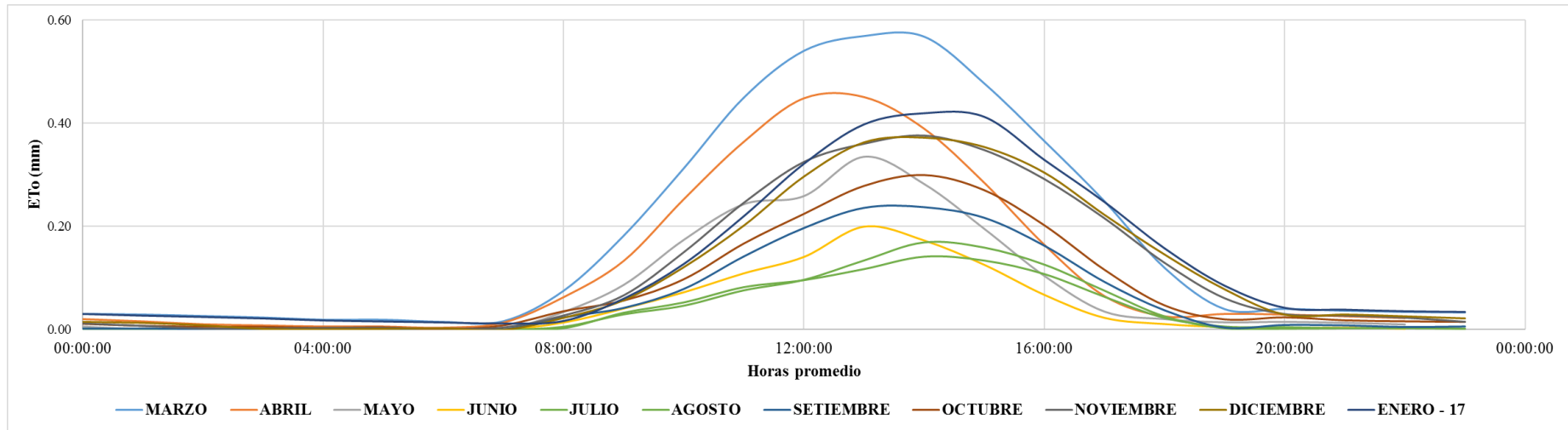


Figura 43: Variación horaria de la radiación solar.

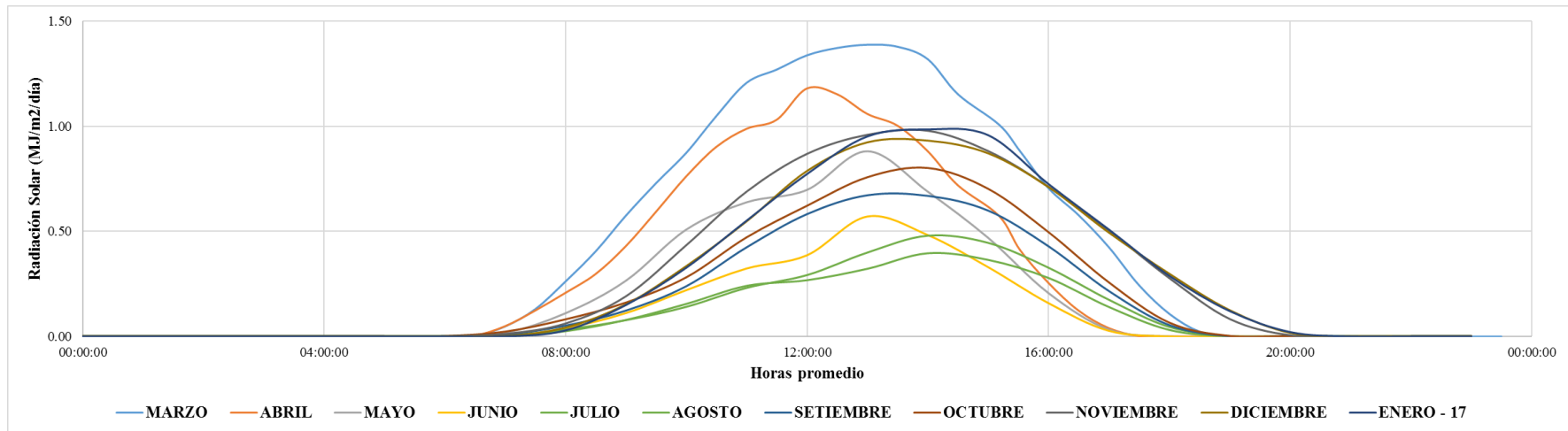


Figura 44: Variación horaria de la temperatura.

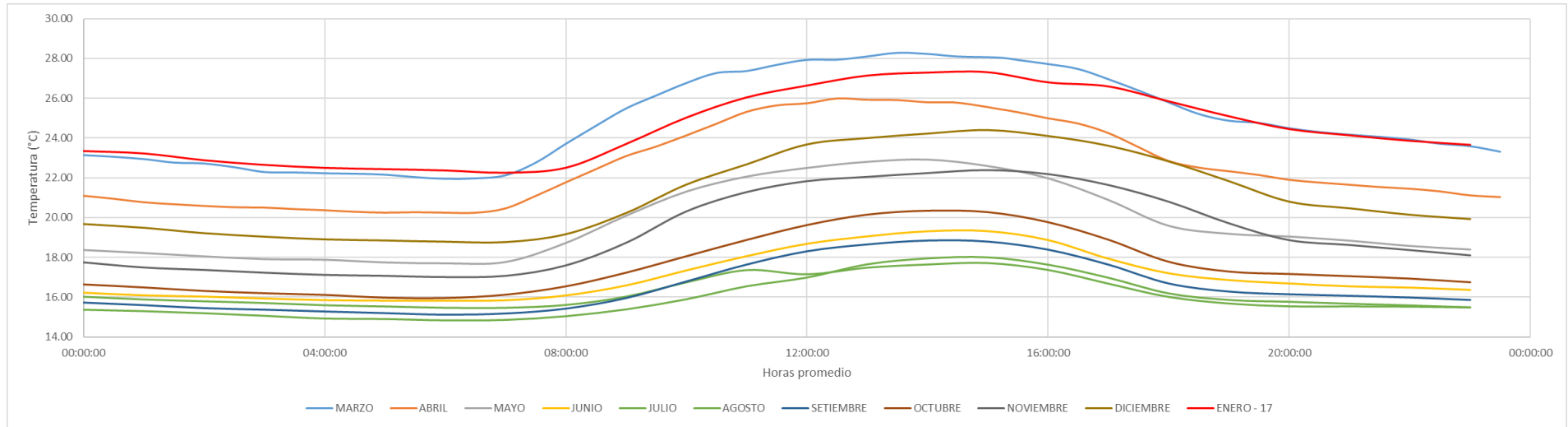


Figura 45: Variación horaria de la humedad relativa.

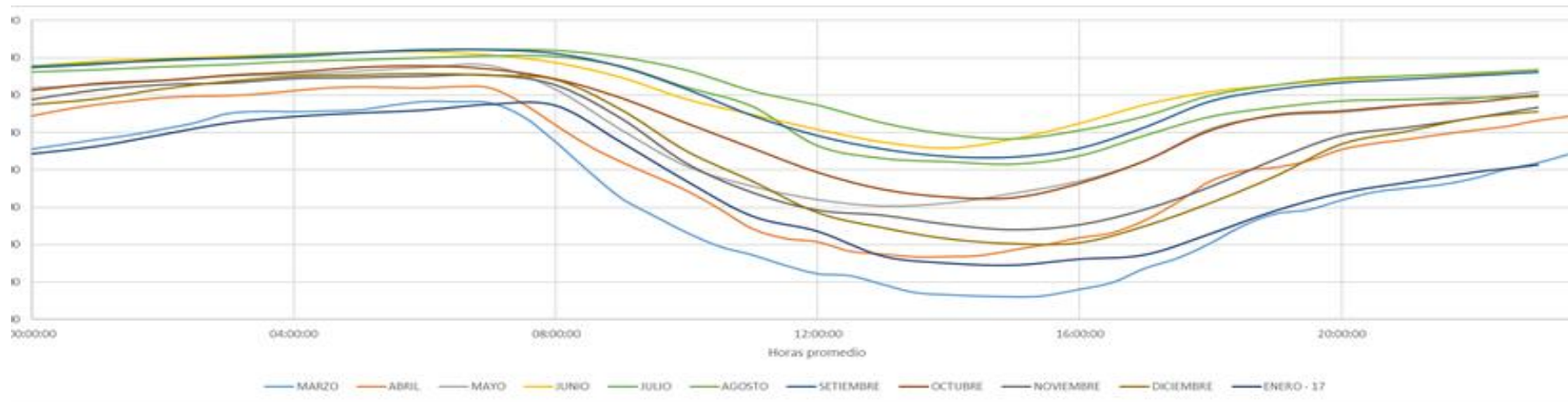
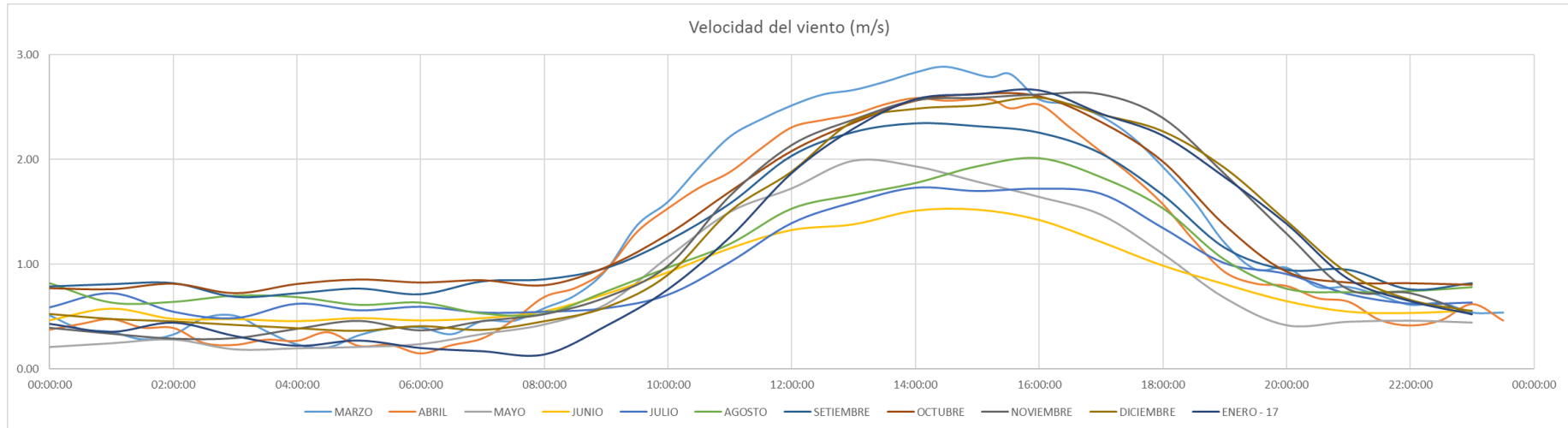


Figura 46. Variación horaria de la velocidad del viento.



4.1.3 Características del suelo y agua en área experimental de riego por goteo

La textura del suelo es franca arenosa, con una la capacidad de campo del suelo de $0.24 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y el punto de marchitez permanente de $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y una densidad aparente de $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$, valores que están dentro de los rangos del tipo de textura del suelo según la FAO (Allen *et al.* 2006). La conductividad eléctrica fue de $1.55 \text{ dS}/\text{m}$, lo cual indica que se trata de un suelo muy ligeramente salino y el pH de 7.77 indicando que el suelo es ligeramente alcalino. El porcentaje de materia orgánica fue de 1.96% . La fuente de agua es el río Rímac, la conductividad eléctrica del agua fue de $0.49 \text{ dS}/\text{m}$, y clasificó como C2, de salinidad moderada, el pH 7.16 del agua indico que es ligeramente neutra. La relación de absorción de sodio (RAS) 0.60 , agua de clasificación S1, indica que no hay peligro de sodio. Se evaluó el índice de saturación de Langelier en -0.48 , no presentándose riesgo potencial de precipitación del carbonato de calcio, por lo que no hubo peligro de obstrucción de goteros por formación de precipitados, cabe señalar que cuando el índice es positivo no se recomienda el uso para el riego por goteo (Güngör y Arslan 2016, Abdulhussein 2018), o tomar las medidas preventivas adecuadas en el mantenimiento del sistema.

Fue necesario la aplicación de láminas de agua adicionales, para evitar la salinización del suelo, debido al riego de alta eficiencia y la falta de precipitación en la zona. Los valores de conductividad eléctrica en los tratamientos variaron de 1.2 a $2.25 \text{ dS}/\text{m}$, el requerimiento de lavado asciende a 2.45% , equivalente a $19.6 \text{ mm}/\text{año}$, considerando una conductividad eléctrica de $10 \text{ dS}/\text{m}$ en el extracto de saturación y de $0.49 \text{ dS}/\text{m}$ en el agua, valor suficiente de lámina de lavado, debido a la tolerancia a la salinidad del césped americano obtenida en otras investigaciones (Ramírez y Hernández 2016).

4.2 COEFICIENTE DE RIEGO DEL CÉSPED AMERICANO, UTILIZANDO RGS

4.2.1 Tratamientos, láminas de agua y monitoreo del sistema RGS

En la Figura 37, se presenta la variación temporal promedio diaria y mensual de la ETo; el valor máximo diario de ETo fue de $4.71 \text{ mm}/\text{día}$ el 15 del mes de febrero y la mínima de $0.33 \text{ mm}/\text{día}$ el 31 de mayo. La ETo promedio mensual, para los meses de enero, febrero y marzo (verano) fueron de 3.1 , 3.83 y $3.84 \text{ mm}/\text{día}$ respectivamente, y para los meses julio, agosto y setiembre (invierno) fueron 1.24 , 0.96 y $1.52 \text{ mm}/\text{día}$, respectivamente. La ETo

acumulada anual fue 827.56 mm. La lámina de riego acumulada aplicada en los tratamientos T1= 1 ETo, T2 = 0.8 ETo, T3 = 0.6 ETo y T4 = 0.4 ETo, fueron de 827, 662, 496 y 331 mm/año, respectivamente. En la Cuadro 6, se observa las láminas aplicadas por tratamiento a nivel mensual.

Cuadro 6: Láminas aplicadas acumuladas a nivel mensual para los tratamientos (mm)

Lamina aplicada acumulado (mm)												
Tratamiento	ago-16	sep-16	oct-16	nov-16	dic-16	ene-17	feb-17	mar-17	abr-17	may-17	jun-17	jul-17
T1	29.65	44.10	60.48	81.79	83.49	96.07	107.33	118.98	84.34	51.42	31.48	38.43
T2	23.72	35.28	48.38	65.43	66.79	76.86	85.86	95.18	67.47	41.14	25.18	30.74
T3	17.79	26.46	36.29	49.07	50.09	57.64	64.40	71.39	50.60	30.85	18.89	23.06
T4	11.86	17.64	24.19	32.72	33.40	38.43	42.93	47.59	33.74	20.57	12.59	15.37

Durante el monitoreo de los caudales a nivel de subunidad, se obtuvo una ecuación de regresión lineal que relaciona las láminas teóricas y las láminas aplicadas, se obtuvo una pendiente de 1.07, valor muy cercano a unidad. Los puntos observados no fueron valores atípicos, lo cual significa que no se presentaron fallas, como la rotura de mangueras enterradas o el taponamiento de goteros en el RGS.

Al finalizar la investigación (segundo año de uso) se realizaron excavaciones en el terreno para extraer los laterales y realizar la inspección sobre la posible invasión de raíces en los goteros, en especial en el tratamiento de 0,4 ETo, que estuvo sometido a mayor déficit de agua; al respecto se observó que los goteros no estaban afectados (Figura 47). Se evaluó también el coeficiente de distribución de uniformidad en base a la humedad volumétrica del suelo, utilizando TDR 350, obteniéndose valores entre 92 a 90%, resultados que son similares obtenidos por otros investigadores en RGS (Ayars *et al.* 2015, Munoth *et al.* 2016, Straw 2018).



Figura 47: a) Excavación de laterales enterrados b) Inspección de los goteros enterrados del tratamiento 0,4 ETo, no presenta invasión de raíces.

4.2.2 Monitoreo de humedad y eficiencia del uso de agua

Los porcentajes de agua disponible para las plantas para el mes de febrero y agosto se presentan en las Figuras 49 y 50, son meses representativos de las estaciones de verano e invierno. Utilizando estas figuras y datos tabulares de todos los meses del año, se obtuvo los porcentajes de agotamiento de la humedad en el suelo utilizados en los tratamientos durante las estaciones del año, se presentan en la Cuadro 7, los cuales fueron obtenidos del monitoreo con los sensores FDR. La Figura 48: , se presenta la curva de retención de humedad del suelo desde el punto de saturación hasta el punto de marchitez permanente y los respectivos potenciales mátricos, que permitió conocer es estado energético del agua en el suelo según los tratamientos aplicados. Para el césped, según FAO, el porcentaje de agotamiento (p) varía hasta el 60 % en invierno y en verano hasta el 50 % (Allen *et al.* 2006), en los tratamientos el agua retenida en el suelo tuvo un potencial mátrico en el rango de 3 a 100 metros correspondiendo porcentajes de agotamiento hasta 88 %. Los coeficientes 1.0 y 0.8 ETo son elegibles para la estación de verano y otoño. En invierno son elegibles los coeficientes 0.6 y 0.4 ETo. En primavera son elegibles los coeficientes 0.8, 0.6 o 0.4 ETo, para la elección final de los coeficientes se consideró adicionalmente, otros criterios como la apariencia estética del césped y el mantenimiento.

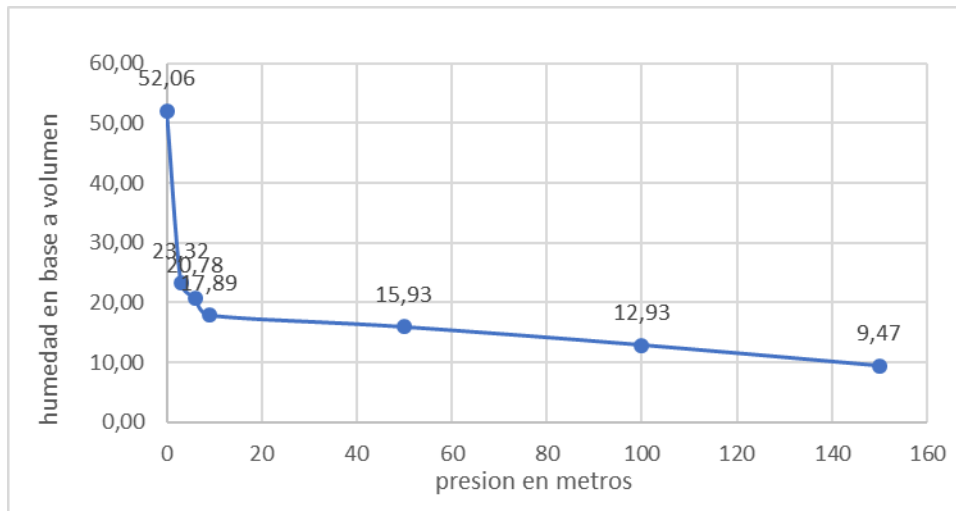


Figura 48: Curva de retención de humedad del suelo.

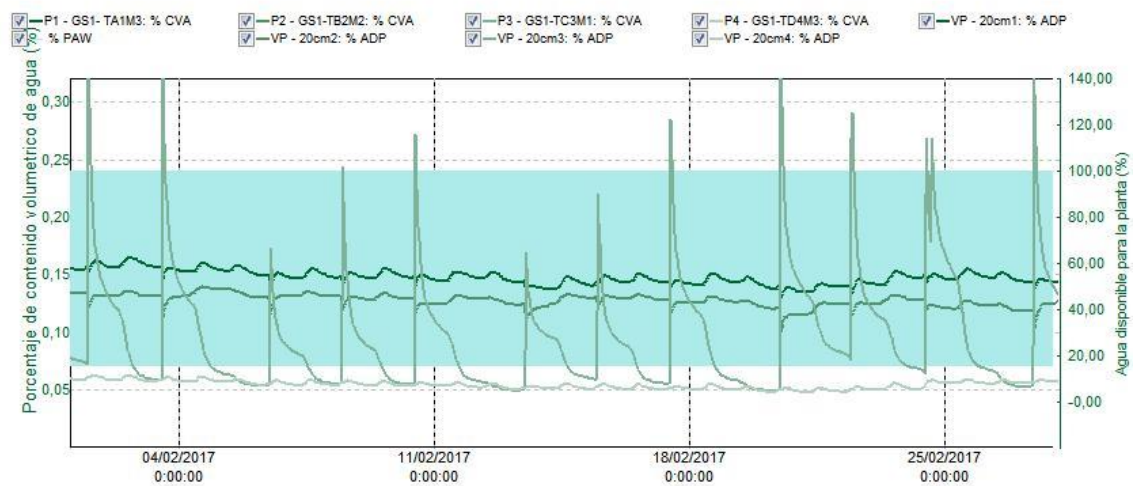


Figura 49: Agua disponible para la planta, mes de febrero.

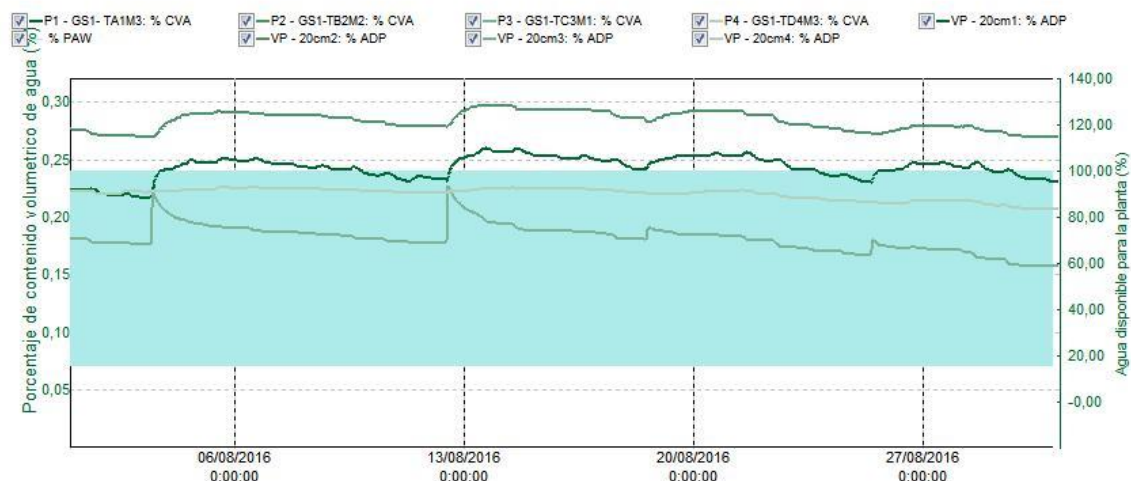


Figura 50: Agua disponible para la planta, mes de agosto.

Cuadro 7: Porcentaje de humedad disponible (p) utilizado por tratamiento

Estación del año	Tratamientos				ETo mm/día
	1.0ETo	0.8ETo	0.6ETo	0.4ETo	
Verano	38	42	65	75	3.59
Otoño	21	48	83	88	1.84
Invierno	-21	-8	50	40	1.24
Primavera	4	54	54	58	2.44

El agua transpirada represento más del 98 % del total, y el 2 % restante la planta lo utiliza para la formación hojas, tallos y raíces, cuyo peso está relacionados al costo de mantenimiento del corte y traslado del césped. En la Cuadro 8, se presentan los valores del UEA, se observó para verano, otoño e invierno el tratamiento T3 presentó el valor más alto UEA y para primavera el T4 presento el valor más alto UEA. En verano la ETo promedio es 3.59 mm/día, las láminas de agua aplicadas para los tratamientos 0.6 ETo y 0.4 ETo, representan una menor disponibilidad de agua en el suelo, la transpiración se reduce lo cual significa una menor cantidad de agua utilizada por la planta y por tanto una mayor eficiencia en el uso del agua (Allen *et al.* 2006). En invierno la ETo promedio fue de 1.24 mm/día, la demanda evaporativa es menor, las condiciones de estrés hídrico fueron menores que en verano y la disponibilidad de agua en el suelo para el césped fue la adecuada para los tratamientos 0,6 ETo y 0,4 ETo y en exceso para los tratamientos 1.0 ETo y 0.8 ETo, ver Cuadro 7. No es necesario altas láminas de agua durante el invierno, se justifican únicamente para el lavado de sales.

Las producciones de materia fresca y seca no presentan diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de significancia del 5 %.

La combinación de un césped C4, con un sistema radicular sometido a condiciones restrictivas de humedad e irrigada con un sistema de riego con un 90 % de uniformidad, permite obtener una alta eficiencia del uso del agua (Zhou *et al.* 2014), práctica del manejo que es similar al presente estudio.

Cuadro 8: Eficiencia del uso del agua del césped.

Tratamiento	Verano			UEA (kg/m ³)	Otoño	
	UEA (kg/m ³)	M.seca (kg/m ²)	Volumen (m ³ /ha)		M.seca (kg/m ²)	Volumen (m ³ /ha)
T1	0.278	0.089	3223.8	0.340	0.057	1672.4
T2	0.418	0.108	2579.0	0.390	0.052	1337.9
T3	0.506	0.098	1934.3	0.560	0.056	1003.4
T4	0.494	0.064	1289.5	0.460	0.031	669.0

Tratamiento	Invierno			UEA (kg/m ³)	Primavera	
	UEA (kg/m ³)	M.seca (kg/m ²)	Volumen (m ³ /ha)		M.seca (kg/m ²)	Volumen (m ³ /ha)
T1	0.478	0.054	1121.8	0.310	0.070	2257.6
T2	0.416	0.037	897.3	0.390	0.070	1806.1
T3	0.594	0.040	673.1	0.558	0.076	1354.6
T4	0.497	0.022	448.7	0.590	0.053	903.0

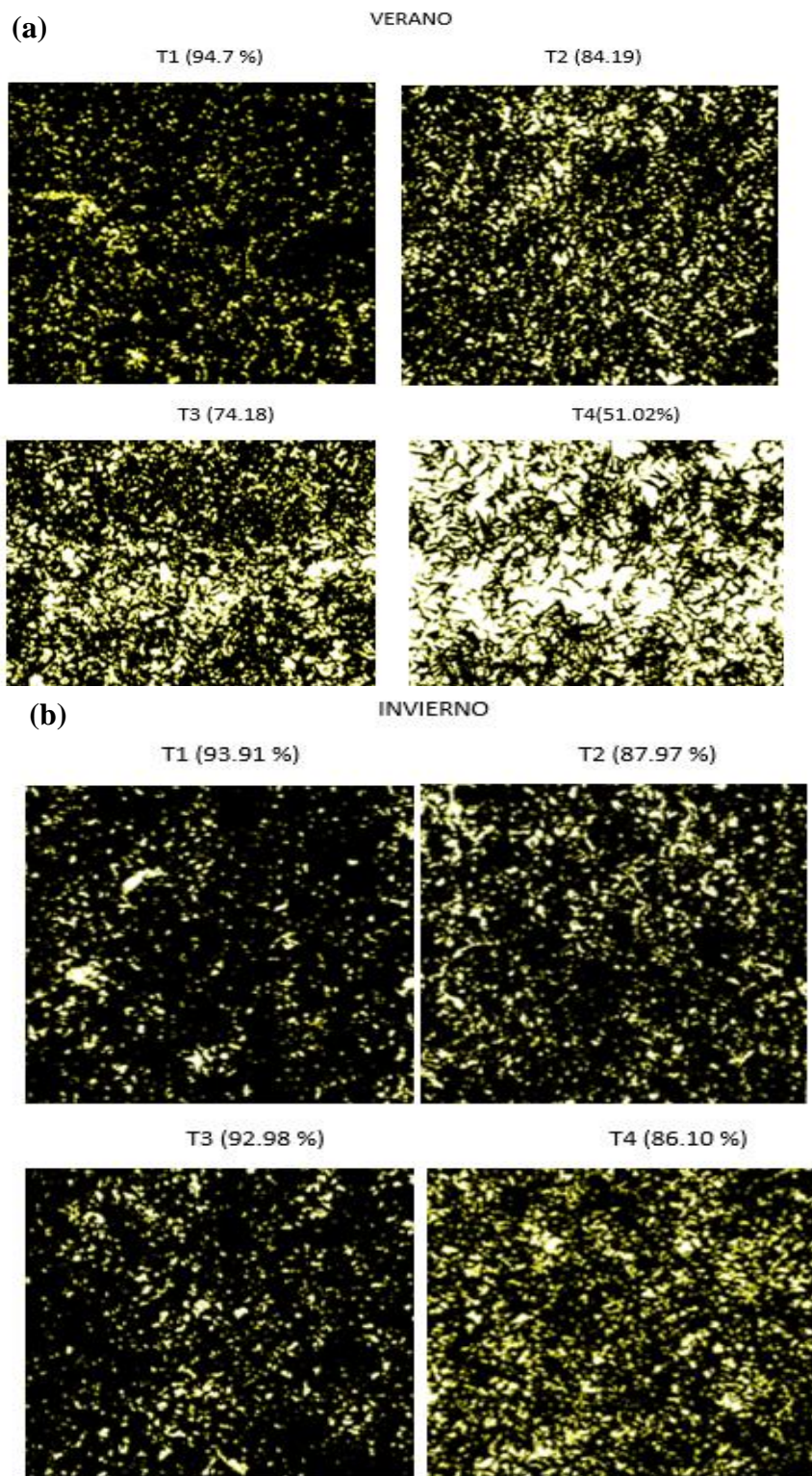
4.2.3 La evaluación cualitativa del césped

Está basada en la valoración de variables visuales como el color, cobertura y uniformidad, la calidad del césped es una medida de la estética y del uso funcional que se le asigne. En la Cuadro 9, se presenta la valoración de la calidad del césped para todas las estaciones y tratamientos. No existe diferencia de la calidad del césped en los tratamientos en invierno, alcanzando el mayor puntaje de 9, en las otras estaciones del año se presentan diferencias de calidades.

Cuadro 9: Valoración de calidad del césped por estación.

Estación	Tratamiento	Color	Cobertura	Uniformidad	Calidad
Verano	T1	3.0	3.0	3.0	9.0
	T2	3.0	3.0	3.0	9.0
	T3	2.0	2.0	2.0	6.0
	T4	1.0	2.0	2.0	5.0
Otoño	T1	3.0	3.0	3.0	9.0
	T2	3.0	3.0	3.0	9.0
	T3	3.0	3.0	2.0	8.0
	T4	2.0	3.0	2.0	7.0
Invierno	T1	3.0	3.0	3.0	9.0
	T2	3.0	3.0	3.0	9.0
	T3	3.0	3.0	3.0	9.0
	T4	3.0	3.0	3.0	9.0
Primavera	T1	3.0	3.0	3.0	9.0
	T2	3.0	3.0	3.0	9.0
	T3	3.0	2.0	2.0	7.0
	T4	2.0	2.0	2.0	6.0

La evaluación visual de la cobertura verde se realizó en base a valoraciones subjetivas y fueron apoyadas con imágenes digitales (Figura 51), se obtuvo valores de correlación entre 0,7 y 0,75, que permitió una evaluación objetiva y consistente de la cobertura del césped como lo reconocen otros investigadores (Bell *et al.* 2009, Zhang *et al.* 2017). En verano se observaron diferencias marcadas entre los tratamientos T1 y T4, con cobertura de 94.7% y 51.02 % respectivamente. En los T3 y T4 se observó el thatch (estrato de fieltro) y fragmentos amarillos del césped y suelo desnudo. En la estación de invierno los porcentajes de cobertura verde para los diferentes tratamientos están en el rango del 93.91% y 86.10 %, observando que el T4 tiene una cobertura adecuada. Para las estaciones de otoño y primavera la cobertura fue mayor al 80 %.



**Figura 51: Imágenes digitales de porcentajes de cobertura verde de los tratamientos
a) Verano b) Invierno.**

4.2.4 Proceso de análisis jerárquico y selección de coeficientes de riego.

La selección del coeficiente de riego de cada estación del año se realizó utilizando el PAJ, considerando los criterios: lámina de agua, mantenimiento (eficiencia del uso del agua) y calidad del césped. Las alternativas fueron los tratamientos T1= 1 ETo, T2 = 0.8 ETo, T3 = 0.6 ETo y T4 = 0.4 ETo, Los criterios y alternativas se presentan en la Cuadro 10. Para la estación de verano y otoño se seleccionó un coeficiente de riego de 0.8 ETo, con un coeficiente de prioridad global de 36.6 %. En la estación de invierno y primavera se seleccionó un coeficiente de riego de 0.4 y 0.6 ETo, con un coeficiente de prioridad global de 56.78 % y 44.39 % respectivamente, las ratios de consistencia se mantuvieron menores al 10 % para todos los casos. Ver Anexo 2 método de análisis jerárquico. La Universidad de Florida para el césped americano selecciono los coeficientes de 0.6 a 0.8 ETo (Zhang *et al.* 2015). En campos de golf de Turquía se concluyó que utilizando el 0.75 ETo, para el césped mixto conformado por Kentucky bluegrass, Red fescue y Rye grass fue el óptimo (Bastug y Buyuktas 2003). El césped Bermuda requiere una lámina de 1.5 ETo en verano, para los campos de futbol en Brasil (Rodrigues *et al.* 2013). Según Litvak y Pataki (2016) y el Departamento de Recursos Hídricos de California recomiendan para los césped de estaciones calientes, un coeficiente de especie de 0.6 ETo como promedio anual. En Oman, para Seashore paspalum, Tifway y Bermuda aplicando 5 mm/día, en un rango de temperaturas de 20 a 33°C, las plantas presentan condiciones aceptables (Alshehhi *et al.* 2010). Se debe considerar las diferentes funciones del césped, para la presente investigación los fines son paisajistas. En los césped de zonas cálidas, la evapotranspiración tiene un amplio rango de valores que depende de la demanda evaporativa, humedad del suelo y puede diferir con el genotipo y prácticas de manejo (Colmer y Barton 2017).

Para los tratamientos seleccionados por estación, el estado energético del agua en el suelo estuvo entre 3 a 50 m durante las estaciones de verano, otoño, primavera e invierno, lo que indica que el césped se encontraba en estrés hídrico, debido al riego deficitario; sin embargo, el césped presentó condiciones estéticas adecuadas.

El requerimiento anual de agua del césped con los coeficientes seleccionados fue de 5,720 m³/ha-año, con una producción de materia seca de césped de 0.229 kg/m², considerando el

coeficiente de riego como 1.0 ETo para todo el año, el volumen anual de agua utilizada es de 8,276 m³/ha-año y una producción de materia seca de césped de 0.241 kg/m². El ahorro en volumen de agua es de 2,555 m³/ha-año, que corresponde al 31%. El ahorro en la producción de materia seca es de 4,4 %, equivalente a 0,012 kg/m² de materia seca de césped.

Cuadro 10: Coeficientes de prioridad (%) y riego seleccionados, utilizando el Proceso Análisis Jerárquico (PAJ)

Estación de verano y otoño				
Alternativa/criterios	Lámina	Calidad	Mantenimiento	Prioridad Global
T1 (CR = 1.0)	10.62	42.38	6.86	20.31
T2 (CR = 0.8)	38.36	42.38	13.44	36.60
T3 (CR = 0.6)	24.25	9.73	26.79	19.92
T4 (CR = 0.4)	26.78	5.52	52.91	23.17
Ratio consistencia	7.67	5.73	6.69	1.58
Estación de invierno				
Tratamiento	Lámina	Calidad	Mantenimiento	Prioridad Global
T1 (CR = 1.0)	5.53	5.25	5.53	5.44
T2 (CR = 0.8)	11.76	9.18	11.76	10.93
T3 (CR = 0.6)	26.21	28.17	26.21	26.84
T4 (CR = 0.4)	56.49	57.4	56.49	56.78
Ratio consistencia	4.33	8.45	4.33	1.58
Estación de primavera				
Tratamiento	Lámina	Calidad	Mantenimiento	Prioridad Global
T1 (CR = 1.0)	8.15	9.46	6.85	8.41
T2 (CR = 0.8)	11.99	7.51	13.13	10.69
T3 (CR = 0.6)	44	44.69	44.59	44.39
T4 (CR = 0.4)	35.87	38.34	35.43	36.6
Ratio consistencia	6.93	6.82	8.95	1.58
CR, coeficiente de riego.				

4.2.5 Coeficiente de riego del césped americano, utilizando aspersión

La estación de verano es crítica para las áreas verdes urbanas que utilizan el recurso hídrico del río Rímac, debido al alto requerimiento hídrico de las plantas y la falta de agua, porque el río se arrasa la bocatoma rustica existente ubicada en Santa Clara. Según Jauregui (2017), realizó un estudio en verano y aplicó diferentes láminas de

riego en base la gradiente de la ETo, con los siguientes valores 100% ETo, 75% ETo y 50% ETo, se utilizó un diseño completo al azar, con tres repeticiones por tratamiento. Se evaluó cobertura, uniformidad y apariencia estética del césped, bajo condiciones controladas se obtuvo un valor coeficiente de riego de 0.75, para los meses de enero, febrero y marzo, donde el césped presentó condiciones visuales aceptables, buena uniformidad y color adecuados para el uso paisajista y utilitario.

En la Cuadro 11 se presenta los coeficientes de riego estimados para todos los meses del año, se consideró la eficiencia de riego de 70 % al inicio del proyecto, valor obtenido de las evaluaciones del coeficiente de la distribución de uniformidad de riego utilizando rotores. En los meses de enero, febrero, marzo y abril, se presentó la situación más crítica, debido a la mayor demanda de agua por parte de las plantas y la falta de agua para llenar los reservorios, porque la bocatoma rústica fue arrasada por las avenidas del río Rímac.

Para el año 2016-2017 se presentó para los meses de verano y abril coeficientes de riego inferiores a 0.75, lo cual indica que el césped estuvo bajo estrés y se observó una baja calidad visual, con excepción del mes de febrero que su coeficiente de riego fue de 0.77. Los bajos valores del coeficiente de riego durante los meses de verano provocan estrés a la planta, además de la salinización del suelo y para evitarlo es necesario la aplicación de una lámina de lavado en los meses de junio, julio, agosto y setiembre. En la estación de invierno los coeficientes de riego fueron superiores a la unidad, para el mes de agosto fue 1.3 y setiembre 1.47 con excepción de julio 0.7, valor menor debido al corte de agua que se realizó para la limpieza de la red principal de canales. En las estaciones de otoño e invierno, los coeficientes riego fueron mayores a 0.6, que son condiciones adecuadas para obtener una calidad visual satisfactoria para el césped.

En la Universidad de A&M Texas, se realizó una evaluación de la programación de riego basado en la Eto para el césped americano, se determinó un coeficiente de riego de 0.6, valor que permite una aceptable calidad del césped (Fontanier *et al.* 2017).

Cuadro 11: Coeficientes de riego, año 2016 -2017.

Año	Mes	V. Aplicado (m3/mes)	Area (ha)	L.Aplicada (mm/día)	L.Aplicada (mm/mes)	Vol. Aplicado (m3/ha-mes)	ETo (mm/día)	ETo (mm/mes)	Eto (m3/ha-mes)	ETo (m3/mes)	Coeficiente de riego
2016	Agosto	8356.70	15.2	1.83	54.98	549.78	0.96	29.65	296.46	4506.12	1.30
2016	Septiembre	14548.00	15.2	3.19	95.71	957.11	1.52	45.62	456.21	6934.34	1.47
2016	Octubre	11087.60	15.2	2.43	72.94	729.45	1.89	58.59	585.90	8905.68	0.87
2016	Noviembre	15921.00	15.2	3.49	104.74	1047.43	2.73	81.79	817.90	12432.08	0.90
2016	Diciembre	20203.50	15.2	4.43	132.92	1329.18	2.69	83.49	834.90	12690.48	1.11
2017	Enero	7210.00	15.2	1.58	47.43	474.34	3.10	96.10	961.00	14607.20	0.35
2017	Febrero	18030.90	15.2	3.95	118.62	1186.24	3.83	107.33	1073.30	16314.16	0.77
2017	Marzo	9362.80	15.2	2.05	61.60	615.97	3.84	118.98	1189.80	18084.96	0.36
2017	Abril	9615.00	15.2	2.11	63.26	632.57	2.81	84.34	843.40	12819.68	0.53
2017	Mayo	13114.90	15.2	2.88	86.28	862.82	1.66	51.42	514.20	7815.84	1.17
2017	Junio	6000.00	15.2	1.32	39.47	394.74	1.05	31.48	314.80	4784.96	0.88
2017	Julio	5800.00	15.2	1.27	38.16	381.58	1.24	38.43	384.30	5841.36	0.70
Acum/prom		139250.40		2.54	916.12		2.28	827.22		125736.86	

4.3 COEFICIENTE DEL CULTIVO (Kc) PARA EL CÉSPED AMERICANO

Se presentan las variables a nivel mensual del balance hídrico del volumen de control en el lisímetro expresados en milímetros, que se utilizaron para determinar la evapotranspiración del cultivo y el coeficiente del cultivo a nivel mensual. Ver Cuadro 12.

Cuadro 12: Variables del balance hídrico y coeficiente del cultivo.

Mes	Precipitación	Riego	Drenaje	Var.Humedad	ETc	ETo	Kc(*)
Agosto	2.50	38.55	10.00	18.00	13.05	29.65	0.44
Setiembre	2.00	57.33	18.00	15.00	26.33	44.1	0.60
Octubre	0.00	78.62	20.00	16.00	42.62	60.48	0.70
Noviembre	0.00	106.33	24.54	19.00	62.79	81.79	0.77
Diciembre	0.00	125.24	41.75	12.00	71.49	83.49	0.86
Enero	0.00	144.11	30.00	24.00	90.11	96.07	0.94
Febrero	0.00	161.00	44.00	15.00	102.00	107.33	0.95
Marzo	0.00	178.47	54.00	10.00	114.47	118.98	0.96
Abril	0.00	126.51	40.00	10.00	76.51	84.34	0.91
Mayo	1.00	66.85	14.50	8.00	45.35	51.42	0.88
Junio	1.50	40.92	10.00	8.00	24.42	31.48	0.78
Julio	2.00	49.96	11.00	21.00	19.96	38.43	0.52

(*) Unidades del Kc es adimensional, las variables se expresan en mm.

4.3.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo)

Se utilizó la ecuación de Penman – Monteith para la obtención de la ETo y los valores se presentan en la Cuadro 12, se observa la variación estacional de la ETo. El valor máximo mensual se presentó en el mes de marzo (118.98 mm/mes), y el mínimo en agosto (29.65 mm/mes), la frecuencia de los balances fue variable, y está en función de la estación del año y la acumulación de la ETo, la mayor frecuencia se presentó durante los meses de verano y menor frecuencia en los meses de invierno. En la Figura 52, se observa el monitoreo de la ETo.

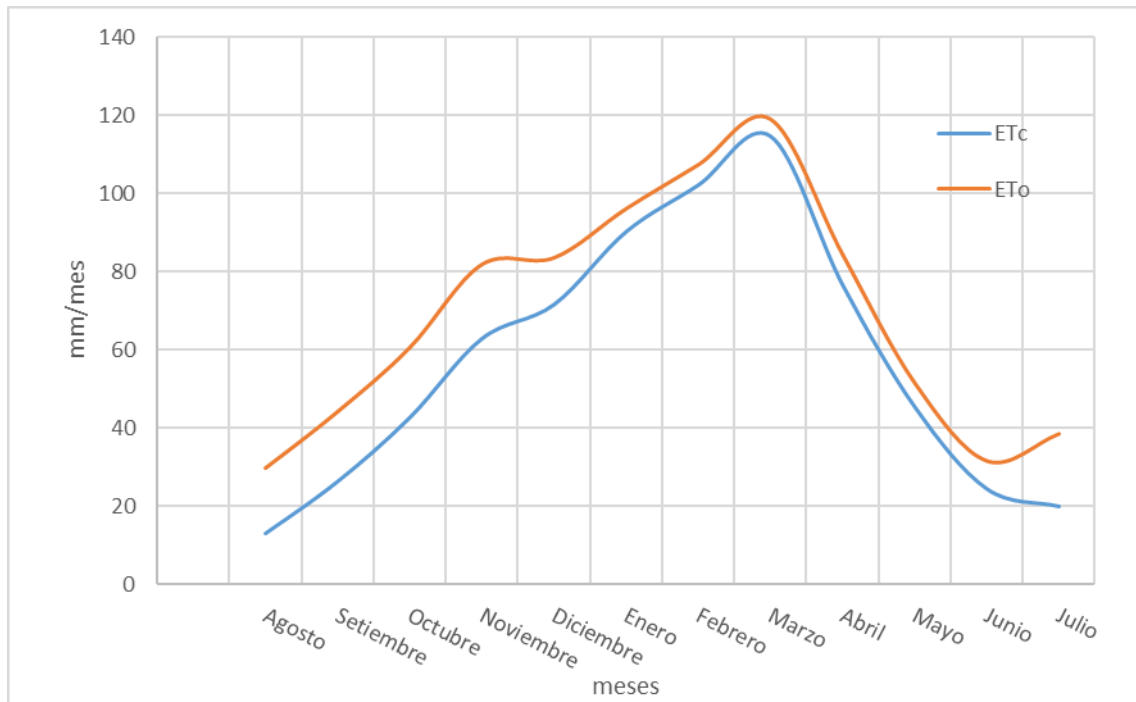


Figura 52: Variación mensual de la Eto y Etc.

4.3.2 Riego

La lámina de riego aplicada es la suma de las ETo diarias multiplicadas por un factor entre 1.3 y 1.5, con el objeto de provocar el drenaje de agua suficiente en el volumen de control del lisímetro. Se realizó la prueba de coeficiente de distribución de uniformidad (DU), en el lisímetro en un área superficial de 0.15 m², se obtuvo un valor de 88 % y la velocidad de aplicación promedio de los difusores fue de 360 mm/hr, considerando un ángulo de riego de 90° en cada difusor.

Con el fin de comprobar la relación entre las láminas calculadas y aplicadas, se procedió a calcular los volúmenes de riego expresaron en litros obtenidos en función a la ETo, y se compararon con los volúmenes medidos en la válvula volumétrica, En la Figura 53: se presenta la función lineal obtenida:

$$\text{Volumen (Válvula)} = 1.0925 \text{ Volumen (ETo)},$$

Se obtuvo una pendiente cercana a la unidad (1.09), demostrando la precisión de los volúmenes aplicados con respecto a los volúmenes calculados (Eto). Además, se comprobó el correcto funcionamiento de los difusores y sus filtros.

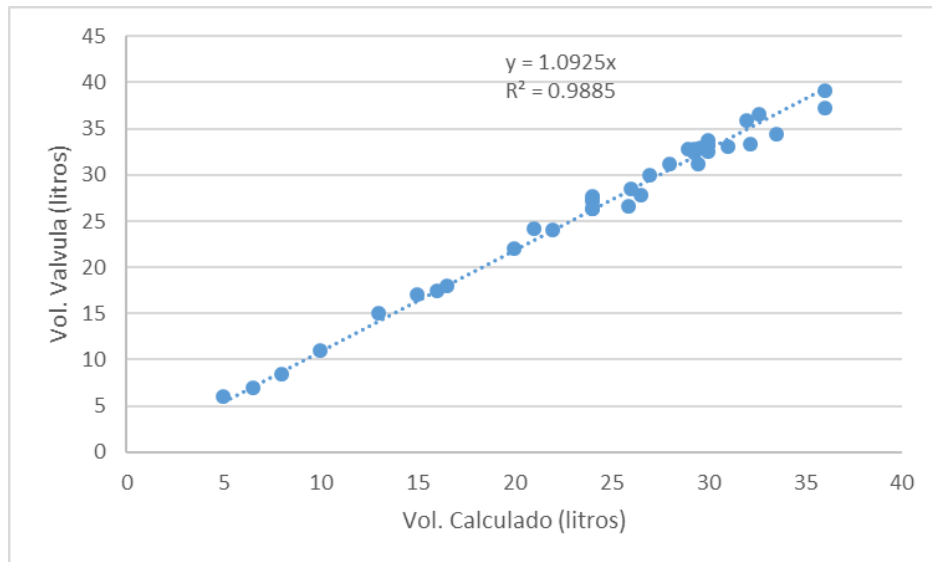


Figura 53: Relación entre volumen calculado y volúmenes aplicados.

4.3.3 Precipitación

La precipitación acumulada registrada en el periodo de evaluación fue de 9 mm/año y se presentó durante la estación de invierno, se presenta en el Cuadro 12.

4.3.4 Drenaje

El drenaje se midió para cada balance hídrico realizado luego de cada evento de riego, los valores máximos del drenaje se presentaron en la estación de verano, porque las ETo son mayores que invierno y se aplicó un 50 % de lámina adicional de la ETo. Los registros de los drenajes acumulados a nivel mensual realizados a lo largo de la investigación se presentan en la Cuadro 12 y Figura 56.

4.3.5 Variación de humedad en el suelo

Los sensores de humedad (watermark) se utilizaron para medir la humedad del suelo en forma indirecta, la precisión que presentaron fue de 0.1 centibar, debido al medidor digital que se utilizó, estos sensores fueron más económicos y precisos que los tensiómetros que tienen una precisión de 2 cbar, mostrada en el vacuómetro.

Se determinó la curva que relaciona los centibares y la humedad del suelo, esta última fue expresada en mm obteniendo una ecuación potencial, con un coeficiente de determinación

R² de 0.98, que se presenta en la Figura 54. Las variaciones promedio de humedad expresadas en lámina de agua (mm) para los sensores de humedad (Watermark) fueron alrededor de 5 mm en el balance hídrico, las cuales se mantuvieron en su mayoría casos alrededor de los 30 cbar, porque el suelo estuvo en condiciones cercanas a capacidad de campo, para determinar el kc en condiciones óptimas de humedad.

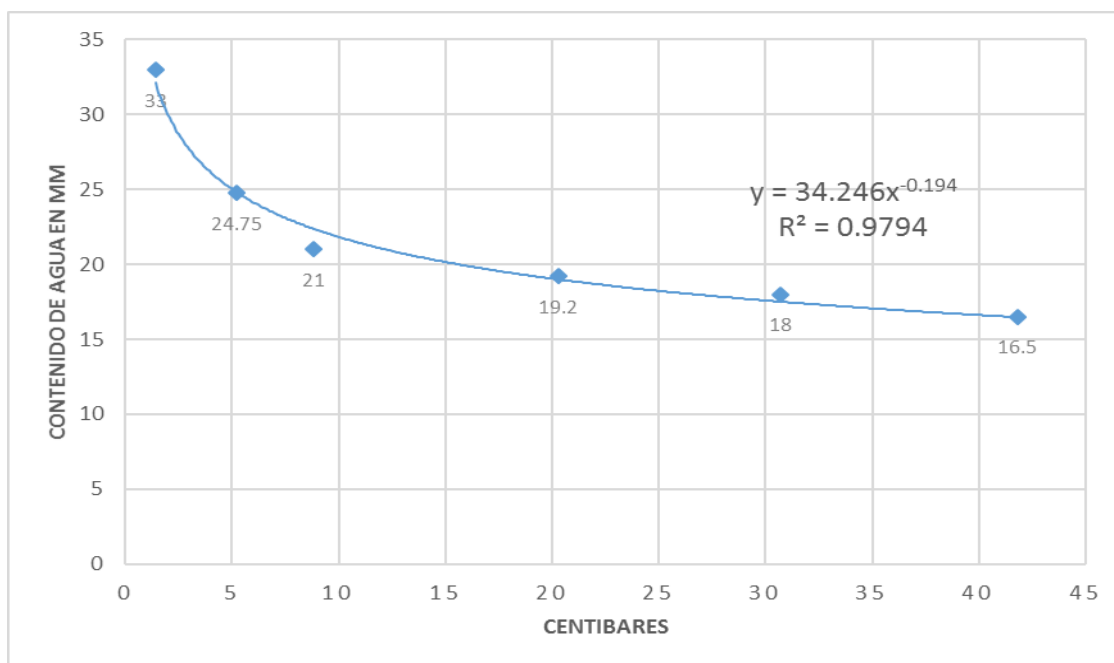


Figura 54: Curvas de calibración de centibares y contenido de humedad en milímetros.

4.3.6 Balance hídrico en el suelo y evapotranspiración del cultivo

Los valores de la ET_c se obtuvieron despejando de la ecuación de balance hídrico del volumen de control que se presenta en la Cuadro 12 y Figura 56. Todas las variables de la ecuación de balance hídrico en el suelo se presentan en milímetros (mm). Se verificó que todos los valores de ET_c a nivel mensual fueron menores a la ET_o, y para la estación de verano estos valores son similares. La precipitación es despreciable con propósitos de riego, presentó un máximo valor de 2.5 mm en el mes de agosto.

4.3.7 Coeficiente de cultivo (kc), césped americano

En la Figura 56, se aprecia la relación entre ET_o y ET_c, donde se observa que los valores de ET_c fueron menores que los valores de ET_o, y los valores de kc del césped americano

fueron menores a la unidad durante todo el periodo de evaluación. En la Figura 55, se presenta los valores mensuales obtenidos del coeficiente de cultivo del césped americano. Los coeficientes de cultivo variaron en función a las estaciones del año. El kc máximo tiene un valor de 0.96 para el mes de marzo y el valor mínimo de kc de 0.44 para el mes de agosto (Cuadro 12 y Figura 55). En la Cuadro 13, se presenta los valores de los coeficientes del césped americano para cada estación del año, obtenido en el periodo agosto 2016 –julio 2017 y el promedio anual fue de 0.78. En el sur este en los Estados Unidos de América se obtuvo un coeficiente de cultivo para el césped de 0.6 promedio anual, para las condiciones meteorológicas específicas del lugar (Wherley *et al.* 2015).

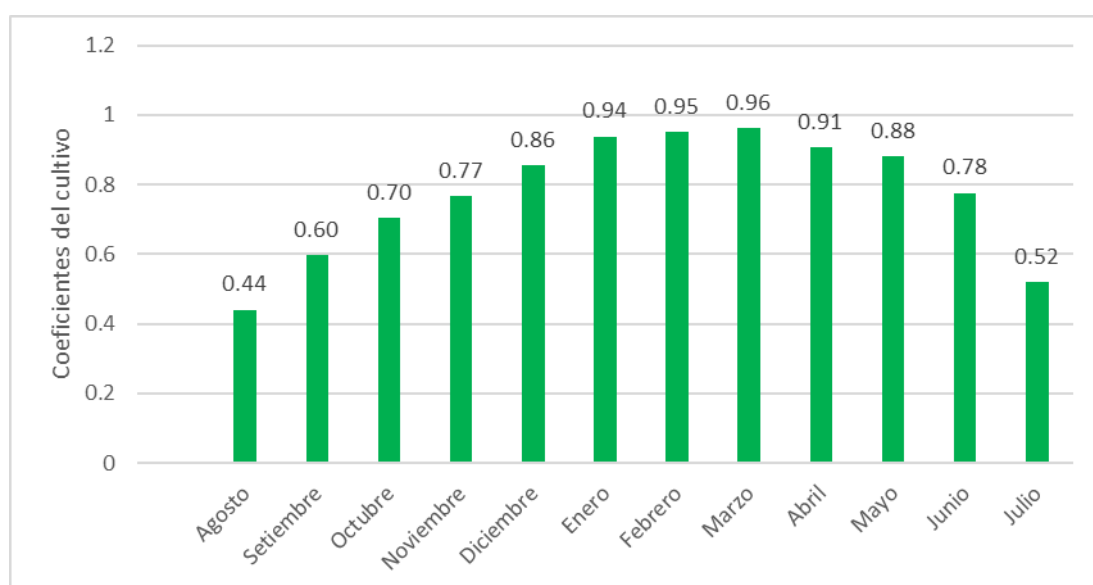


Figura 55: Coeficientes mensuales del césped americano.

Cuadro 13: Coeficientes del césped americano estacional

Estacion	Coeficientes del cespced
Invierno	0.52
Primavera	0.78
Verano	0.95
Otoño	0.85

En la Cuadro 14, se presenta el ahorro de agua por hectárea, cuando los valores de Kc son igual a la unidad durante todo el año y los valores obtenidos en el presente trabajo mediante el balance hídrico del suelo utilizando lisímetros de drenaje, se obtuvo un ahorro

de 1,384 m³ / ha, considerando las 15.2 ha de las áreas verdes urbanas, se obtuvo 21,037 m³/año de ahorro de agua.

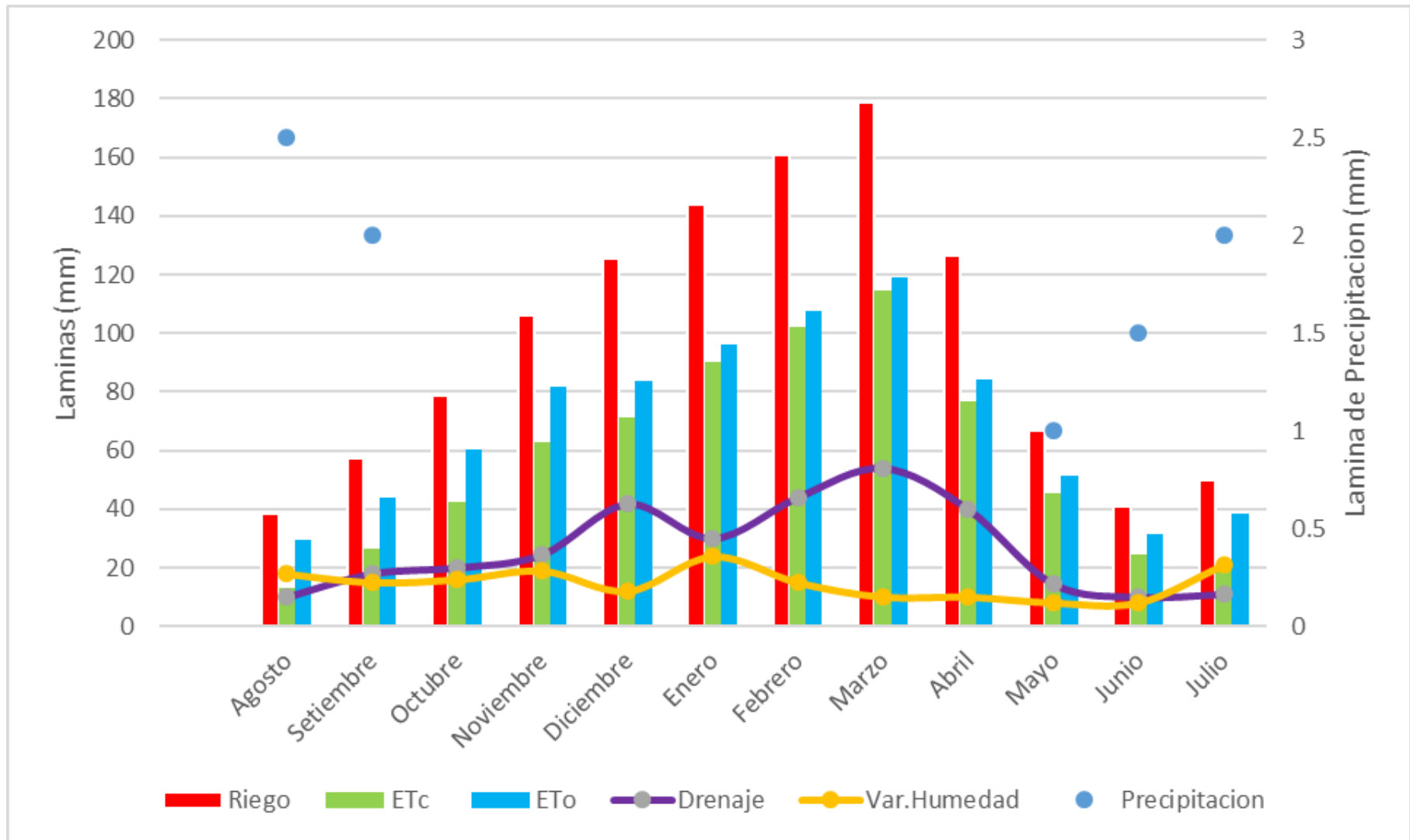


Figura 56: Variables monitoreadas en el balance hídrico.

Cuadro 14: Ahorro de agua utilizando los coeficientes del cultivo.

Mes	Eto (mm)	Kc (*)	ETc (mm)	Kc (**)	ETc (mm)	Ahorro (mm)	Ahorro (m3/ha)
Agosto	29.65	1.00	29.65	0.44	13.05	16.61	166.05
Setiembre	44.10	1.00	44.10	0.60	26.33	17.77	177.70
Octubre	60.48	1.00	60.48	0.70	42.62	17.86	178.56
Noviembre	81.79	1.00	81.79	0.77	62.79	19.00	190.00
Diciembre	83.49	1.00	83.49	0.86	71.49	12.00	120.00
Enero	96.07	1.00	96.07	0.94	90.11	5.97	59.65
Febrero	107.33	1.00	107.33	0.95	102.00	5.33	53.35
Marzo	118.98	1.00	118.98	0.96	114.47	4.51	45.10
Abril	84.34	1.00	84.34	0.91	76.51	7.83	78.30
Mayo	51.42	1.00	51.42	0.88	45.35	6.07	60.74
Junio	31.48	1.00	31.48	0.78	24.42	7.06	70.56
Julio	38.43	1.00	38.43	0.52	19.96	18.47	184.71
Total /promedio	827.56	1.00	827.56		689.09	138.47	1384.72
Kc(*) utilizado en forma comun KC(**) obtenido en la investigación							

4.4 SELECCIÓN Y ZONIFICACIÓN DE ÁREAS CON PLANTAS DE BAJO REQUERIMIENTO HÍDRICO

4.4.1 Identificación y coeficientes de especies de plantas

Según Figueroa (2019), se identificaron 47 especies de árboles entre forestales y frutales, registrando una cantidad total de 1368 árboles, 4 especies de palmeras y 4 especies de césped, siendo la planta predominante el césped americano hasta julio del 2017 en las 15.2 ha. Actualizando el inventario a noviembre de 2019, se identificaron 3 especies de árboles adicionales y se sembraron 150 nuevos árboles frutales.

Para la determinación de los coeficientes de las especies de las plantas se utilizó la zonificación de la evapotranspiración de referencia del estado de California evaluadas por el sistema de información de la administración riego, en ingles denominada Irrigation Management Information System (CIMIS), que abarca 18 zonas climáticas y se presentan en la Cuadro 15, las zonas están agrupadas en 6 regiones como se presenta en la Figura 57. La evapotranspiración potencial de la estación Alexander Von Humboldt, de la UNALM para el periodo 2001 – 2015, también se presenta en la Figura 57. En el Anexo 3, se presenta el mapa de zonificación de la evapotranspiración potencial del estado de California.

La agrupación de las zonas identificadas por CIMIS en seis regiones, son las siguientes:

Región 1: Zonas 1,2,3,4, 6 y 8. Región 2: Zonas 12,14,15 y16.

Región 3: Zonas 1,2,4 y 6. Región 4: Zona 9.

Región 5: Zona 14 y 17 y la Región 6: Zona 18.

Cuadro 15: Evapotranspiración potencial (pulgadas/día) del estado de California.

Fuente: Costello *et al.* (2000)

ET-Zone	City	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
1	Santa Monica	0.03	0.05	0.08	0.11	0.13	0.15	0.15	0.13	0.11	0.08	0.04	0.02
2	Santa Cruz	0.04	0.06	0.10	0.13	0.15	0.17	0.16	0.15	0.13	0.09	0.06	0.04
3	Monterey/Salinas	0.06	0.08	0.12	0.16	0.17	0.19	0.18	0.17	0.14	0.11	0.08	0.06
4	San Diego	0.06	0.08	0.11	0.15	0.17	0.19	0.19	0.18	0.15	0.11	0.08	0.06
5	Santa Rosa	0.03	0.06	0.09	0.14	0.18	0.21	0.21	0.19	0.15	0.10	0.05	0.03
6	Los Angeles	0.06	0.08	0.11	0.16	0.18	0.21	0.21	0.20	0.16	0.12	0.08	0.06
7	Alturas	0.02	0.05	0.08	0.13	0.17	0.21	0.24	0.21	0.16	0.09	0.04	0.02
8	San Jose	0.04	0.06	0.11	0.16	0.20	0.23	0.24	0.21	0.17	0.11	0.06	0.03
9	San Bernardino Pasadena	0.07	0.10	0.13	0.17	0.19	0.22	0.24	0.22	0.19	0.13	0.09	0.06
10	Paicines	0.03	0.06	0.10	0.15	0.19	0.24	0.26	0.23	0.17	0.10	0.05	0.03
11	Sonora	0.05	0.08	0.10	0.15	0.19	0.24	0.26	0.24	0.19	0.12	0.07	0.05
12	Fresno	0.04	0.07	0.11	0.17	0.22	0.26	0.26	0.23	0.18	0.12	0.06	0.03
13	Quincy	0.04	0.07	0.10	0.16	0.21	0.26	0.29	0.25	0.19	0.12	0.06	0.03
14	Sacramento	0.05	0.08	0.12	0.17	0.22	0.26	0.28	0.25	0.19	0.13	0.07	0.05
15	Bakersfield	0.04	0.08	0.12	0.19	0.24	0.27	0.28	0.25	0.19	0.13	0.07	0.04
16	Hanford	0.05	0.09	0.13	0.19	0.25	0.29	0.30	0.27	0.21	0.14	0.08	0.05
17	Needles	0.06	0.10	0.15	0.20	0.26	0.30	0.32	0.28	0.22	0.14	0.09	0.06
18	Palm Springs	0.08	0.12	0.17	0.23	0.28	0.32	0.31	0.28	0.23	0.16	0.10	0.07

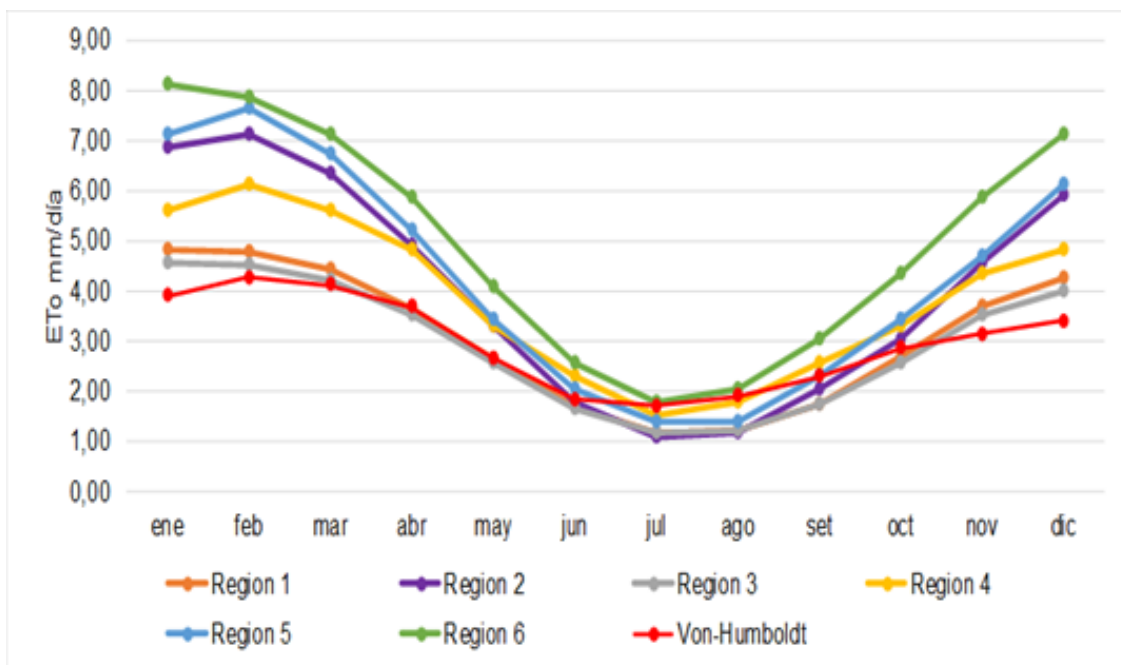


Figura 57: Evapotranspiración potencial de las seis regiones de California y la UNALM.

Con el fin de seleccionar cuál de las seis regiones del estado de California tienen valores similares de la ETo mensuales del distrito de la Molina, se utilizaron los datos climáticos de la UNALM. Se realizó una comparación gráfica presentada en la Figura 57, y una comparación estadística utilizando raíz del error cuadrático medio (RMSE). Se determinó que la región 3, que se encuentra en la costa sur del estado de California (línea de color plomo), tiene una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 0.46, adicionalmente la región 1, que es la zona desértica baja del estado de California (línea de color marrón), se determinó la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 0.54 ligeramente mayor a la región 3, estas regiones se asemejan en valor y comportamiento temporal a los valores de ETo de la UNALM, como se presenta en la Figura 57, fue por este motivo se utilizaron los coeficientes de especies de plantas registradas en Water Use Classifications of Landscape Species, (WUCOLS) de la región 1 y 3, para la selección del coeficiente de especie de las plantas de los campos de la UNALM. Para el caso de las especies de plantas nativas del Perú, se estimó su coeficiente de especie en base a las opiniones de los especialistas y el Manual 56 de la FAO. En la Cuadro 16, se presentan 50 especies identificadas con su coeficiente de especie.

Cuadro 16: Especies de árboles con sistema de riego.

Nº	Nombre científico	Nombre Común	ks
1	<i>Schinus molle</i>	Molle serrano	0.3
2	<i>Acacia aroma</i>	Acacia blanca	0.3
3	<i>Acacia longifolia</i>	Mimosa	0.3
4	<i>Albizia lebeck</i>	Albizia	0.3
5	<i>Caesalpinia paipai</i>	Charan	0.3
6	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	Casuarina	0.3
7	<i>Chorisia speciosa</i>	Ceiba	0.3
8	<i>Cupressus macrocarpa</i>	Ciprés	0.3
9	<i>Cupressus sempervirens</i>	Ciprés vela	0.3
10	<i>Erythrina crista galli</i>	Cresta de gallo	0.3
11	<i>Euphorbia pulcherrima</i>	Flor de navidad	0.3
12	<i>Grevillea robusta</i>	Grevillea	0.3
13	<i>Melia azedarach</i>	Meliá	0.3
14	<i>Olea europaea</i>	Olivo	0.3
15	<i>Parkinsonia aculeata</i>	Azote de cristo	0.3
16	<i>Pinus halepensis</i>	Pino carrasco	0.3
17	<i>Prosopis pallida</i>	Huarango	0.3
18	<i>Tecoma stans</i>	Huaranhuay	0.3
19	<i>Tipuana tipu</i>	Tipa	0.3
20	<i>Jacaranda mimosifolia</i>	Jacaranda	0.4
21	<i>Koelreuteria paniculata</i>	Papelillo	0.4
22	<i>Lagerstroemia speciosa</i>	Árbol de júpiter	0.4
23	<i>Podocarpus spp.</i>	Podocarpus	0.4
24	<i>Schinus Terebinthifolius</i>	Molle hawaiano	0.4
25	<i>Araucaria excelsa</i>	Pino de navidad	0.5
26	<i>Carya illinoensis</i>	Pecana	0.5
27	<i>Cassia fistula</i>	Lluvia de oro	0.5
28	<i>Cedrela odorata</i>	Cedro	0.5
29	<i>Delonix regia</i>	Poinciana real	0.5
30	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Eucalipto	0.5
31	<i>Ficus benamina</i>	Ficus	0.5
32	<i>Ficus carica</i>	Higo	0.5
33	<i>Morus alba</i>	Mora	0.5
34	<i>Prunus serrulata</i>	Cerezo japonés	0.5
35	<i>Sideroxylon capiri</i>	Danto amarillo	0.5
36	<i>Caesalpinia spinosa</i>	Taras	0.5
37	<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	Cedro rosado	0.6
38	<i>Aleurites moluccanus</i>	Nuez de la india	0.6
39	<i>Annona cherimola</i>	Chirimoya	0.6
40	<i>Annona muricata</i>	Guanábana	0.6
41	<i>Bauhinia forficata</i>	Pata de vaca	0.6
42	<i>Inga feuillei</i> ^a	Pacay	0.6
43	<i>Mangifera indica</i> ^a	Mango	0.6
44	<i>Persea americana</i>	Palto	0.6
45	<i>Pouteria lucuma</i> ^a	Lúcuma	0.6
46	<i>Schefflera actinophylla</i>	Schefflera	0.6
47	<i>Spathodea campanulata</i>	Tulipán africano	0.6
48	<i>Swietenia macrophylla</i> ^a	Caoba del Perú	0.6
49	<i>Annona muricataa</i>	Guanábana	0.6
50	<i>Citrus aurantifolia</i>	Limón	0.6

Se identificaron cuatro especies de palmeras, teniendo un total de 56 palmeras en las áreas verdes con sistema de riego por aspersión presentes en la UNALM. En la Cuadro 17, se presentan las especies de palmeras, el coeficiente y la cantidad.

Cuadro 17: Especies de palmeras.

N°	Nombre científico	Nombre común	ks
1	<i>Chrysalidocarpus lutescens</i>	Hawaiana	0.4
2	<i>Phoenix canariensis</i>	Palmera fénix	0.3
3	<i>Roystonea regia</i>	Palmera real	0.4
4	<i>Washingtonia robusta</i>	Palmera abanico	0.3

Fuente: (Figueroa Asencios 2019).

Se identificaron tres especies de césped en las áreas verdes con sistema de riego por aspersión. En la Cuadro 18, se presentan las especies y el coeficiente de especie para la estación de verano.

Cuadro 18: Especies de césped.

N°	Nombre científico	Nombre común	ks
1	<i>Cynodon dactylon</i>	cesped bermuda	0.75
2	<i>Stenotaphrum secundatum</i>	cesped americano	0.75
3	<i>Paspalum notatum</i>	cesped paspalum	0.75

Fuente: (Jauregui Vera 2017).

4.4.2 Demanda de las áreas verdes actual, considerando el coeficiente de jardín (KJ)

En la Cuadro 19, presenta los valores promedios mensuales y diarios de la ETo, obtenida de la estación automática Davis, para el año 2016-2017. Para la determinación del coeficiente del jardín (KJ), se seleccionó un coeficiente de especie (ks) máximo de 0.6 correspondiente a las especies de árboles de mayor demanda hídrica que se presenta en el Cuadro 16, los mismos que están asociados con el césped americano con un ks de 1, valor utilizado previo al estudio. Las áreas de riego presentan una planta dominante que es el césped americano y arboles con cubiertas de copa alrededor o menor del 60 %, por lo que

asignó un coeficiente de densidad (kd) de 1. Las áreas de riego presentaron un entorno de campo abierto para algunas subunidades, como por ejemplo las áreas frente a la Biblioteca Agrícola Nacional, mientras que en otras subunidades existe la presencia de edificios, salones y sin vientos fuertes, menores a 4 m/s, motivo que se asignó un coeficiente de microclima (km) de 1.

El sistema de riego tiene 106 válvulas o subunidades, se calculó un K_j igual a la unidad para la situación del riego actual inicial. No se han considerado las áreas verdes del jardín botánico, áreas de cereales y maíz, porque se siguen regando con sistemas de riego por gravedad, utilizando los surcos para las áreas de cereales e inundación para el Jardín Botánico. El área actual bajo riego por aspersión fue de 15.02 ha y se consideró una eficiencia de riego inicial de 70 % para rotores y difusores, valor que fue asignado considerando las evaluaciones rápidas realizadas de los coeficientes de distribución de uniformidad luego de la instalación del sistema.

En la Cuadro 19, se presenta la demanda de la situación actual. Se presenta el número de veces que el reservorio debe llenarse por mes, con una oferta de agua de 250 l/s, cada 7 días, durante 10 horas para el llenado del reservorio.

Cuadro 19: Demanda de agua considerando el coeficiente de jardín (KJ).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom/Acum.
Area de jardines (ha)	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20
Eto (mm/día)	3.10	3.83	3.84	2.81	1.66	1.05	1.24	0.96	1.52	1.89	2.73	2.69	2.28
Coeficiente de Jardin(KJ)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ETJ (mm/día)	3.10	3.83	3.84	2.81	1.66	1.05	1.24	0.96	1.52	1.89	2.73	2.69	2.28
Lámina neta (mm/mes)	96.10	107.24	119.04	84.30	51.46	31.50	38.44	29.76	45.60	58.59	81.90	83.39	827.32
Eficiencia de riego	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
Lámina bruta (mm/día)	4.43	5.47	5.49	4.01	2.37	1.50	1.77	1.37	2.17	2.70	3.90	3.84	3.25
Lámina bruta (mm/mes)	137.29	153.20	170.06	120.43	73.51	45.00	54.91	42.51	65.14	83.70	117.00	119.13	1181.89
Demanda de agua (m3/mes)	20867.43	23286.40	25848.69	18305.14	11174.17	6840.00	8346.97	6462.17	9901.71	12722.40	17784.00	18107.54	179646.63
Número reservorios/mes	2.32	2.59	2.87	2.03	1.24	0.76	0.93	0.72	1.10	1.41	1.98	2.01	19.96
Capacidad neto reservorio(m3)	9000.00												
Tiempo de llenado/reservorio (hr)	10.00												
Caudal (m3/hr)	900.00												
Caudal (l/s)	250.00												
T. llenado de reservorios hr/mes	23.19	25.87	28.72	20.34	12.42	7.60	9.27	7.18	11.00	14.14	19.76	20.12	199.61

4.4.3 Selección de especies de plantas de bajo requerimiento hídrico

a) Especies de árboles seleccionados

Se presentaron 27 alternativas de especies de árboles seleccionados, utilizando los siguientes criterios: moderado a bajo requerimiento hídrico, tolerancia a la sequía, tipo de copa, bajo mantenimiento y productivo. En la Cuadro 20, se presentan las especies de árboles seleccionados con sus respectivas Ks y clasificación de árbol forestal o frutal.

Cuadro 20: Especies de árboles seleccionados.

Nombre Científico	Nombre común	ks	Forestal / Frutales
<i>Acacia longifolia</i>	Mimosa	0.3	Forestal
<i>Casuarina cunninghamiana</i>	Casuarina	0.3	Forestal
<i>Chorisia speciosa</i>	Ceibo	0.3	Forestal
<i>Grevillea robusta</i>	Grevilea	0.3	Forestal
<i>Melia azedarach</i>	Melia	0.3	Forestal
<i>Olea europaea</i>	Olivo	0.3	Frutal
<i>Parkinsonia aculeata</i>	Azote de cristo	0.3	Forestal
<i>Prosopis pallida</i>	Hurango	0.3	Forestal
<i>Schinus molle</i>	Molle Serrano	0.3	Forestal
<i>Tecoma stans</i>	Huaranhuay	0.3	Forestal
<i>Tipuana tipu</i>	Tipa	0.3	Forestal
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	Jacaranda	0.4	Forestal
<i>Koelreuteria paniculata</i>	Papelillo	0.4	Forestal
<i>Schinus terebinthifolius</i>	Molle hawaiano	0.4	Forestal
<i>Delonix regia</i>	Poinciana real	0.5	Forestal
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Eucalipto	0.5	Forestal
<i>Caesalpinia spinosa</i>	Taras	0.5	Forestal
<i>Carya illinoensis</i>	Pecana	0.5	Frutal
<i>Ficus carica</i>	Higo	0.5	Frutal
<i>Morus alba</i>	Mora	0.5	Frutal
<i>Annona cherimola</i>	Chirimoya	0.6	Frutal
<i>Annona muricata</i>	Guanábana	0.6	Frutal
<i>Inga feuillei</i> ^a	Pacay	0.6	Frutal
<i>Mangifera indica</i> ^a	Mango	0.6	Frutal
<i>Persea americana</i>	Palto	0.6	Frutal
<i>Pouteria lucuma</i> ^a	Lúcuma	0.6	Frutal
<i>Citrus aurantifolia</i>	Limón	0.6	Frutal

La selección de plantas de moderado a bajo requerimiento hídrico fue necesario debido a la escasez actual del agua y la competencia entre los diferentes usuarios, particularmente el uso poblacional y el riego, la fuente de agua es el río Rímac.

La selección de plantas tolerantes a la sequía fue debido a las siguientes razones: a) Escasez de agua en el río, b) La falta de garantía por parte de la junta de usuarios para proporcionar caudales y tiempos pactados en los turnos de riego, c) Falta de estructuras de captación, conducción y distribución, d) Falta de pago de las tarifas de agua de los usuarios, e) Incremento de la ETo debido a la variabilidad climática y f) Robos de agua.

El criterio de selección por el tipo de copa en los árboles debe permitir proteger a los usuarios de las altas temperatura y radiación del verano, la sombra producida por el árbol crea un microclima favorable que disminuye la evapotranspiración del césped u otra planta que se encuentre bajo su cobertura. Los estudiantes y personal tienen preferencias por zonas con sombra para su confort durante el descanso y estudio.

El criterio de mantenimiento está relacionado con la frecuencia del corte y traslado de materia seca o húmeda del césped, limpieza de hojas, flores y frutos de árboles. No se consideró las podas, cuya frecuencia debe ser cada dos años y supervisadas por un especialista forestal o agrónomo.

A partir de año 2017 se viene sembrando árboles frutales con mayor intensidad en las áreas verdes urbanas, los árboles seleccionados son: Palta, chirimoya, guanábano, pecana, higo, pacay, mango, mora, olivo, lúcuma y limón, a la fecha 150 árboles frutales adicionales dentro de las áreas verdes urbanas. Estos árboles frutales seleccionados tienen bajo requerimiento hídrico, los cuales cumplen funciones paisajistas y utilitaria, esperando que en el futuro se adicione una función utilitaria que es la alimentaria.

b) Especies de cubre suelos

En la Cuadro 21, se presenta las posibles especies de cubre suelos, para su selección se consideró los siguientes criterios: requerimiento hídrico, tolerancia a la sequía y mantenimiento.

Cuadro 21: Especies de cubre suelos.

Nombre científico	Nombre común	ks
<i>Aptenia cordifolia</i>	Planta del roció	0.4
<i>Carpobrotus edulis</i>	Clavel chino	0.4
<i>Festuca ovina</i>	Festuca	0.4
<i>Gazania rigens</i>	Gazania	0.5
<i>Lantana montevidensis</i>	Lantana rastrera	0.5

Los cubre suelos recomendables a sembrar en los jardines son; la planta del Roció y el Clavel Chino, con un bajo requerimiento hídrico, tolerante a la sequía y con un metabolismo fotosintético tipo CAM, que permite realizar el uso eficiente del agua durante el proceso de fotosíntesis. La desventaja de estas plantas es que no soportan el pisoteo y deberán ser ubicadas en áreas donde no exista tránsito de personas. En la Cuadro 22, se presenta las especies de cubre suelos seleccionados.

Cuadro 22: Clasificación de especies de cubre suelos.

Nombre científico	Nombre común
<i>Aptenia cordifolia</i>	Planta del roció
<i>Carpobrotus edulis</i>	Clavel chino

a) Especies de césped

Los criterios para la selección del césped fueron los siguientes: requerimiento hídrico, tolerancia a la sequía, resistencia al pisoteo, crecimiento bajo sombra y mantenimiento. En la Cuadro 23, se presentan las tres especies de césped.

Cuadro 23: Especies de césped.

Nombre científico	Nombre común	ks	Tolerancia a la sequía	Funcionalidad		Mantenimiento
				Resistencia a la sombra	Resistencia al pisoteo	
<i>Cynodon dactylon</i>	Bermuda	0.75	Alto	Bajo	Alto	Medio
<i>Stenotaphrum secundatum</i>	Americano	0.75	Medio	Alto	Medio	Medio
<i>Paspalum notatum</i>	Paspalum	0.75	Medio	Bajo	Medio	Bajo

La selección de la especie de césped deberá cumplir con los siguientes requisitos: a) Bajo requerimiento hídrico y/o presentar una calidad visual aceptable cuando se realiza riego deficitario, b) Tolerante a la sequía c) Resistente al pisoteo para soportar el tránsito de la población universitaria en las áreas verdes d) Crecer bajo la sombra proporcionada por los árboles, porque crea un microclima adecuado que mitiga los efectos de la temperatura y radiación solar durante la estación de verano, disminuyendo el requerimiento de agua y e) bajo mantenimiento en el corte del césped bajo riego deficitario, pero mantiene una calidad visual adecuada.

Se sometió a las siguientes especies de césped bermuda, americano y paspalum a diferentes coeficientes de riego de 1.0, 0.75 y 0.50 ETo, durante la época de verano, se obtuvo como

resultado que el césped americano, con un valor de 0.75 ETo, presento la mejor calidad visual, cobertura y uniformidad que las otras especies (Jauregui Vera 2017).

El césped americano se mantiene sin problemas en la sombra, con coberturas de sombra superiores al 50 % en comparación con otras especies. El césped Bermuda es muy resistente al tránsito, motivo por el cual debe ser utilizada en áreas deportivas con alta luminosidad, porque no es resistente a la sombra ni a las bajas temperaturas. El césped Paspalum es resistente a la salinidad. En base a los criterios mencionados se seleccionó al césped americano y bermudas, que se presenta en la Cuadro 24.

Cuadro 24: Especies de césped.

Nombre científico	Nombre común	Zonificación
<i>Stenotaphrum secundatum</i>	Americano	Áreas bajo sombra
<i>Cynodon dactylon</i>	Bermuda	Áreas deportivas o con alta luminosidad

4.4.4 Zonificación de áreas verdes según el uso

Se zonificó las áreas verdes según el tipo de uso en paisajista y utilitario, este último se subdivide en las siguientes clases: a) descanso, b) estudio, c) exposiciones, d) recreación, e) deporte y f) productivo.

El área de uso únicamente paisajista son aquellas áreas que no pueden ser invadidas o pisadas por los usuarios debido a la naturaleza del cubre suelo o plantas.

Las áreas verdes urbanas normalmente se presentan más de dos usos, como se presenta en la Figura 58, es común la asociación de césped y árboles para el uso paisajista y utilitario. Las áreas netamente paisajistas son aquellas que no pueden ser invadidas por los usuarios debido a la naturaleza de las plantas sembradas como los cubre suelos, ubicadas en los jardines pequeños o alargados (Color verde claro de la Figura 58). El uso utilitario -descanso y estudio, son las áreas frente a las Facultad de ciencias y Departamento Recursos hídricos y Mecanización Agrícola entre otras areas (Color naranja de la Figura 58). El uso utilitario-exposiciones, está considerado aquellas áreas donde se realizan eventos como graduaciones de los estudiantes, congresos, exposiciones de equipos o maquinaria, son las áreas frente al rectorado, a la Biblioteca Nacional Agrícola y Escuela

de Pos Grado (Color naranja de la Figura 58). El uso utilitario- deportivo, donde se desarrollan las actividades deportivas y fiestas, estas áreas son relativamente grandes y estén sembradas solamente con césped y no están asociadas con árboles, son los estadios de la UNALM y las áreas verdes bajo la dirección de la Oficina de Proyección Social (color celeste de la Figura 58). El uso utilitario – productivo son aquellas áreas sembradas de césped, que actualmente se están sembrando árboles frutales de bajo requerimiento hídrico, como la pecana, mora, palta, higo, limón y lúcuma. Áreas ubicadas en la Alameda central y jardines entre salones (Color verde oscuro de la Figura 58)

Cabe resaltar que se propone reducir las áreas de césped americano, cambiando el césped por un cubre suelos de menor requerimiento hídrico, pero sin resistencia al pisoteo, este cambio trae consigo una campaña para evitar que los miembros de la comunidad molinera y visitantes no pisen las áreas de uso paisajista. En las Figuras 59 y 60 se presentan los tipos de cobertura y coeficientes de las plantas respectivamente.

En la Cuadro 25, se presenta el resumen de los tipos de usos, el uso utilitario abarca el 90 % y el uso solo paisajista representa el 10 %. El uso utilitario productivo abarca el 9 %, el cual puede incrementarse, si disminuye el utilitario de descanso y los requerimientos hídricos no incrementarán debido a la selección de árboles son típicos de zonas áridas o de bajo requerimiento hídrico que se presentan en la Cuadro 20.

Las áreas verdes de la UNALM que están bajo riego por aspersión operan en base a turnos de riego, cada turno está compuesto por 3 a 4 válvulas que se abren en forma simultánea formando un turno de riego, cada válvula tiene un área bajo riego y se caracterizan porque los emisores tienen velocidades de aplicación iguales o similares. En la Cuadro 26, 27 y 28, se presenta el controlador, los turnos, número de válvulas, tipo de emisor, caudal, área, cobertura vegetal, coeficiente de especie y tipo de uso. En la Figura 61, se muestra la ubicación de las válvulas.

Cuadro 25: Tipos de usos.

Tipo de uso	Area (m2)	Porcentaje (%)
Descanso	92968.60	61.18
Productivo - descanso	13651.30	8.98
Deportivo	30184.06	19.86
Paisajista	15165.55	9.98
Total	151969.51	100.00

Cuadro 26: Áreas de uso paisajista, descanso, deportivo y productivo.

CONTROLADOR ESP-LXD									
TURNOS	Nº VAL. CAMPO	EMISOR	CAUDAL /VAL. (l/s)	AREA (m2), Valvula	AREA (m2), Turno	COB. VEGETAL	KS	Uso(*)	
1	1	ROTORES	4.77	2143.30	8794.50	Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp	
	2		4.02	2135.50			0.75	De, Pa, Dp	
	3		6.31	2072.90			0.75	De, Pa, Dp	
	4		4.96	2442.80			0.75	De, Pa, Dp	
2	5		4.96	2429.20	7867.80	Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp	
	41		6.32	1106.80			0.75	De, Pa, Dp	
	6		7.44	2071.90			0.75	De, Pa, Dp	
3	7		6.18	2259.90	9437.60	Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp	
	9		6.16	2715.70			0.75	Pr	
	8		7.16	2539.50			0.75	De, Pa, Dp	
	14		7.19	2006.20			0.75	Pr	
4	15		8.01	2176.20	8125.30	Césped, árboles	0.75	Pr	
	10		7.98	2146.60			Cubre suelo, árboles	0.3	Pa
	12		7.34	2191.90			Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp
	13		7.14	2143.90			Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp
5	16		5.49	1642.90	8023.70	Césped, árboles	0.75	Pr	
	17		5.18	2046.90			0.75	De, Pa, Dp	
	18		5.46	2199.50			0.75	De, Pa, Dp	
	21		7.51	1930.70			0.75	De, Pa, Dp	
6	22		7.06	1846.60	8003.25	Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp	
	23		6.75	2445.40			0.75	De, Pa, Dp	
	24		7.71	1629.90			0.75	De, Pa, Dp	
	46		10.03	1800.70			0.75	De, Pa, Dp	
7	19		2.31	2127.25	7826.00	Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp	
	25		4.69	1912.70			Césped, árboles	0.75	Pr
	27		6.47	1997.30			Cubre suelo, árboles	0.75	Pr
	28		5.76	1909.50			Cubre suelo, árboles	0.75	Pr
8	26		6.79	2006.50	7633.90	Césped, árboles	0.75	Pr	
	33		6.09	1811.90			0.75	De, Pa, Dp	
	42		7.05	2112.60			0.75	De, Pa, Dp	
	29		7.19	1750.70			0.75	De, Pa, Dp	
9	31		7.82	1958.70	8199.20	Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp	
	35		6.34	2256.20			0.75	De, Pa, Dp	
	30		5.66	1982.90			0.75	De, Pa, Dp	
	32		7.57	1908.50			0.75	De, Pa, Dp	
10	36		7.29	2051.60	7127.80	Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp	
	37		8.52	1894.80			0.75	De, Pa, Dp	
	39		6.74	2000.90			0.75	De, Pa, Dp	
	40		3.58	1245.30			0.75	De, Pa, Dp	
11	43		7.83	1986.80	6882.40	Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp	
	44		8.22	2306.00			0.75	De, Pa, Dp	
	45		5.99	1308.20			0.75	De, Pa, Dp	
	47		6.73	1891.40			0.75	De, Pa, Dp	
12	48		4.91	1376.80	7769.50	Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp	
	49		11.76	2000.60			Cubre suelo, árboles	0.3	Pa
	56		5.98	2043.00			Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp
	57		6.83	2166.70			Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp
13	70		5.98	1559.20	6449.30	Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp	
	64		7.85	1565.30			0.75	De, Pa, Dp	
	68		7.85	1237.20			0.75	De, Pa, Dp	
	65		7.85	1529.90			0.75	De, Pa, Dp	
14	66		7.85	2116.90	4479.65	Césped, árboles	0.75	De, Pa, Dp	
	67		7.85	2397.40			0.75	De, Pa, Dp	
	71		4.27	579.19			0.75	De, Pa, Dp	
	72		4.97	713.91			0.75	De, Pa, Dp	
	73		4.97	789.15			0.75	De, Pa, Dp	
					106619.90	106619.90			

(*)Pa : paisajista, De:descanso, Dp: deportivo, Pr:productivo

Cuadro 27: Áreas de uso paisajista.

CONTROLADOR ESP-LXD								
TURNOS	Nº VAL. CAMPO	TIPO DE EMISOR	CAUDAL /VAL. (L/s)	AREA (m2), Valvula	AREA (m2), Turno	COB. VEGETAL	KS	Uso(*)
15	3	ROTORES	4.02	200.00	963.30	Cubre suelo, árboles	0.75	Paisajista
	74		10.07	209.30				
	75		8.56	554.00				
16	85	DIFUSORES	7.9	288.23	1340.32			
	76		11.23	474.34				
	77		7.34	577.75				
17	80	DIFUSORES	10.64	447.93	1375.08			
	78		9.36	484.30				
	79		6.63	442.85				
18	81	DIFUSORES	14.73	503.78	1363.63			
	82		9.02	440.93				
	83		6.27	418.92				
19	84	DIFUSORES	6.17	454.96	1497.54			
	86		8.8	593.05				
	88		9.33	449.53				
20	93	DIFUSORES	8.8	400.27	1421.07			
	87		9.31	499.40				
	89		7.24	521.40				
21	91	DIFUSORES	8.26	510.30	1465.62			
	92		10.5	551.17				
	98		5.83	404.15				
22	99	DIFUSORES	6.39	378.59	1195.67			
	94		10.01	326.03				
	95		8.26	491.05				
23	90	DIFUSORES	7.74	406.25	1323.07			
	96		8.66	425.63				
	97		7.57	491.19				
24	105	DIFUSORES	10.71	601.08	1569.33			
	100		7.36	485.63				
	101		7.3	482.62				
25	104	DIFUSORES	8.86	681.41	1650.92			
	103		6.2	417.59				
	106		8.22	551.92				
SUBTOTAL				15165.55	15165.55			
(*)Pa : paisajista, De:descanso, Dp: deportivo, Pr:productivo								

Cuadro 28: Áreas de uso deportivo y descanso.

CONTROLADOR ESP-LXME									
TURNOS	Nº VAL. CAMPO	TIPO DE EMISOR	CAUDAL /VAL. (L/s)	AREA m2	AREA (m2), Turno	COB. VEGETAL	KS	Uso	
26	51	ROTORES	6.87	1984.53	6777.64	CESPED	0.75	Deportivo, Descando	
	52		6.87	2165.20					
	116		6.87	1230.43					
	69		6.87	1397.48					
27	58		ROTORES	6.83	2081.11				5510.44
	59			5.98	1816.81				
	60			5.98	1612.52				
28	61		ROTORES	5.98	1982.88				5563.25
	62			5.98	1614.85				
	63			5.98	1965.52				
	112			6.83	1015.22				
29	115		ROTORES	8.54	1624.24				5041.13
	113			8.54	1249.80				
	114			6.83	1151.87				
	50			6.34	3157.93				
30	53		ROTORES	5.49	2734.12				7291.60
	54	3.80		1399.55					
SUBTOTAL				30184.06	30184.06				
(*)Pa : paisajista, De:descanso, Dp: deportivo, Pr:productivo									



Figura 58: Tipos de uso: Paisajista (PA), deportivo (Dep), paisajista -descanso (Pa, De), paisajista, descanso y productivo (Pa, De, Pr) y paisajista-productivo (Pa,Pr).



Figura 59: Tipos de coberturas.



Figura 60: Coeficientes de jardín (Kj).

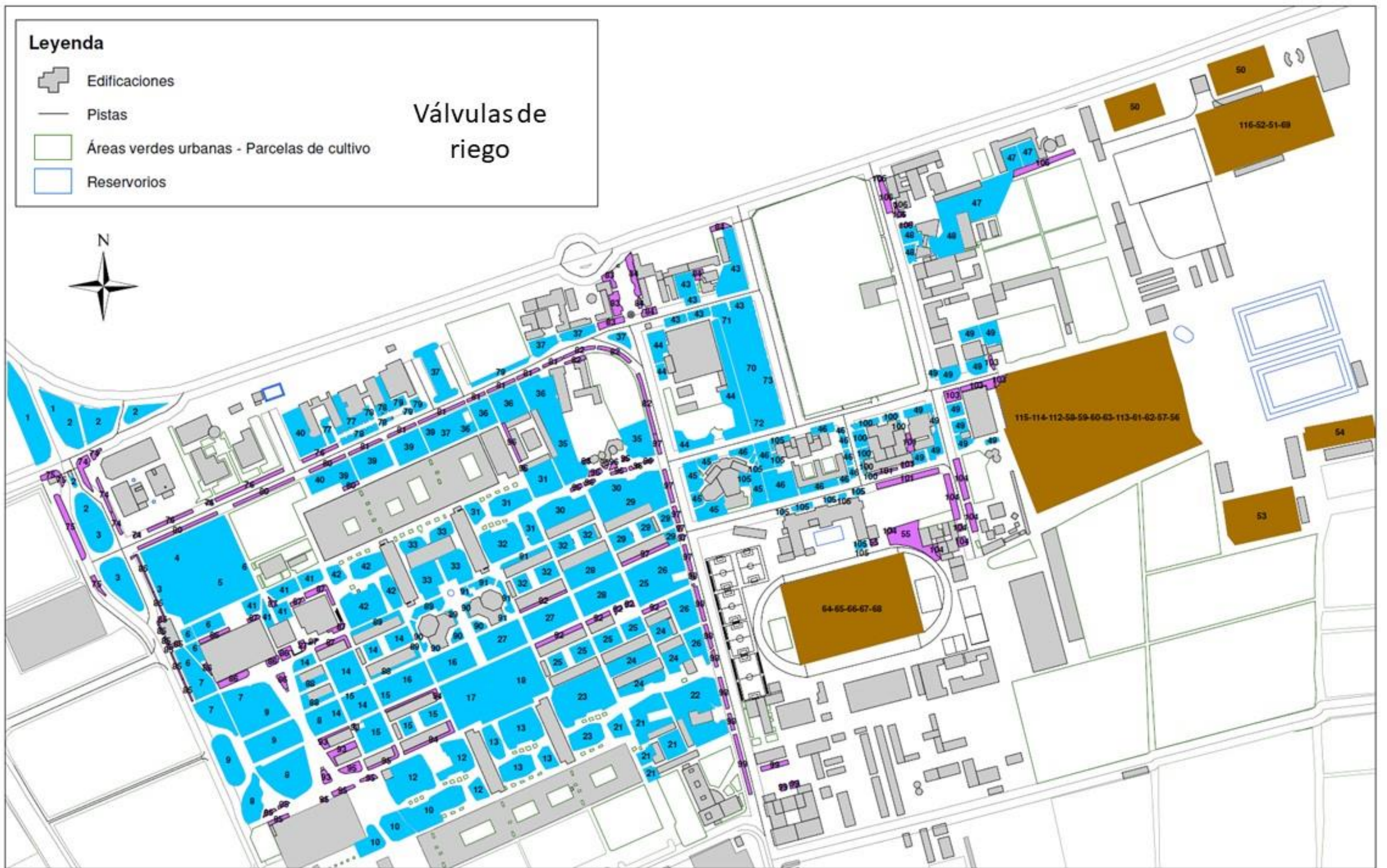


Figura 61: Turnos de riego.

4.4.5 Evaluación hidráulica de las subunidades de riego por aspersión

Se desarrollo el análisis de requerimiento de presión y caudal de la subunidad de riego 33, se obtuvo el coeficiente de uniformidad y eficiencia de riego para el sistema por aspersión y goteo, los criterios utilizados son los mismos para las demás subunidades.

En el sistema de riego por aspersión actual, las subunidades de riego están compuestas por una válvula hidráulica PGA 200 Rain Bird, un solenoide, un decodificador, que está conectado al mono cable que trasmite la señal eléctrica e información que es enviada del controlador LMX-DXL, utilizando un voltaje de 24 voltios.

Las tuberías que distribuyen el agua a los emisores son de PVC, los diámetros de la red interna en las subunidades de riego fueron las siguientes: 90 mm, 2", 1.5", y 1", de clase 10. Los emisores utilizados fueron difusores de la serie VAN, toberas giratorias, rotores 3500, 5000 y Falcon 6504, la selección del emisor depende básicamente de las dimensiones, forma de las áreas verdes y velocidad de aplicación expresada en mm/hr, la cual deberá ser la misma o similar en los emisores de la subunidad de riego, para obtener un riego uniforme, el caudal por válvula varia de 3.5 - 8 l/s.

En la Cuadro 29, se presenta un resumen de las características de los emisores utilizados en las subunidades. Las especificaciones técnicas de los emisores se presentan en el Anexo 4.

Cuadro 29: Características de los emisores.

Emisor	Modelo	Radio (m)	Caudal (m3/hr)	Rango de	Presion	Vel. Aplicación (mm/hr)	
				Presion (m)	Actual (m)	Cuadrado	Triangulo
Difusor	Serie VAN	1.2 - 5.5	0.07 - 1.20	10.0 - 21	15 - 20	40.0 - 240.0	46.0 - 280.0
Tob. giratoria	RVAN	4.0 - 7.2	1.48 - 13	21 - 38	30 - 35	15.0 - 16.0	16.0 - 19.0
Rotor	3500	4.0 - 10.0	0.12 - 1.04	17 - 38	30 - 35	12.0 - 18.0	14.0 - 21.0
Rotor	5000	7.0 - 15.0	0.70 - 2.19	17 - 45	30 - 35	5.0 - 19.0	6.0 - 22.0
Rotor	6504	11.9 - 19.8	0.66 - 4.93	21 - 62	40 - 45	9.0 - 25.0	11.0 - 29.0

En la Figura 62, se presenta la subunidad 33, ubicada en los jardines de la Escuela de Posgrado, tiene un área de 1,811.9 m², la presión de entrada en la subunidad fue de 33.25 metros de columna de agua (m.c.a) y un caudal de 5.57 l/s, se utilizaron rotores 5000, con boquillas 1.5 y 2.5, con velocidades de aplicación de 6 y 9 mm/hr. En base a la información de la red de tuberías y los caudales de los emisores se calculó las pérdidas de carga de la ruta crítica, utilizando el programa EPANET V.2.0.

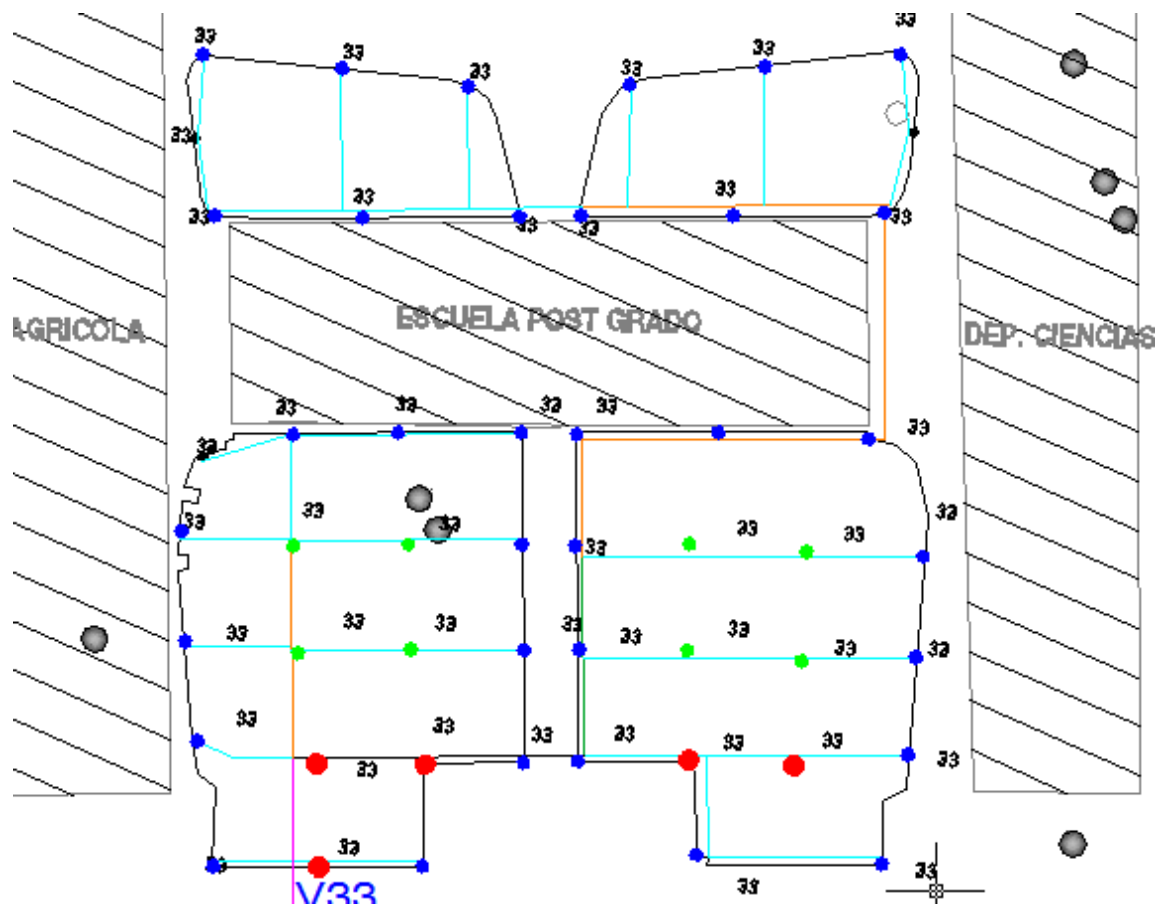


Figura 62: Subunidad 33, riego de los jardines de la Escuela de Posgrado.

En la Figura 63, se presenta las presiones en m.c.a de los emisores, y se determinó que existe una pérdida de carga de 3.25 m.c.a en la ruta crítica, menor a la pérdida permisible de 6 m.c.a, para obtener una variación de caudales menor al 10 % entre los rotores más alejados. El valor de 3.25 m.c.a verifica la adecuada selección de los diámetros de las tuberías y garantiza la uniformidad de aplicación para condiciones de no viento.

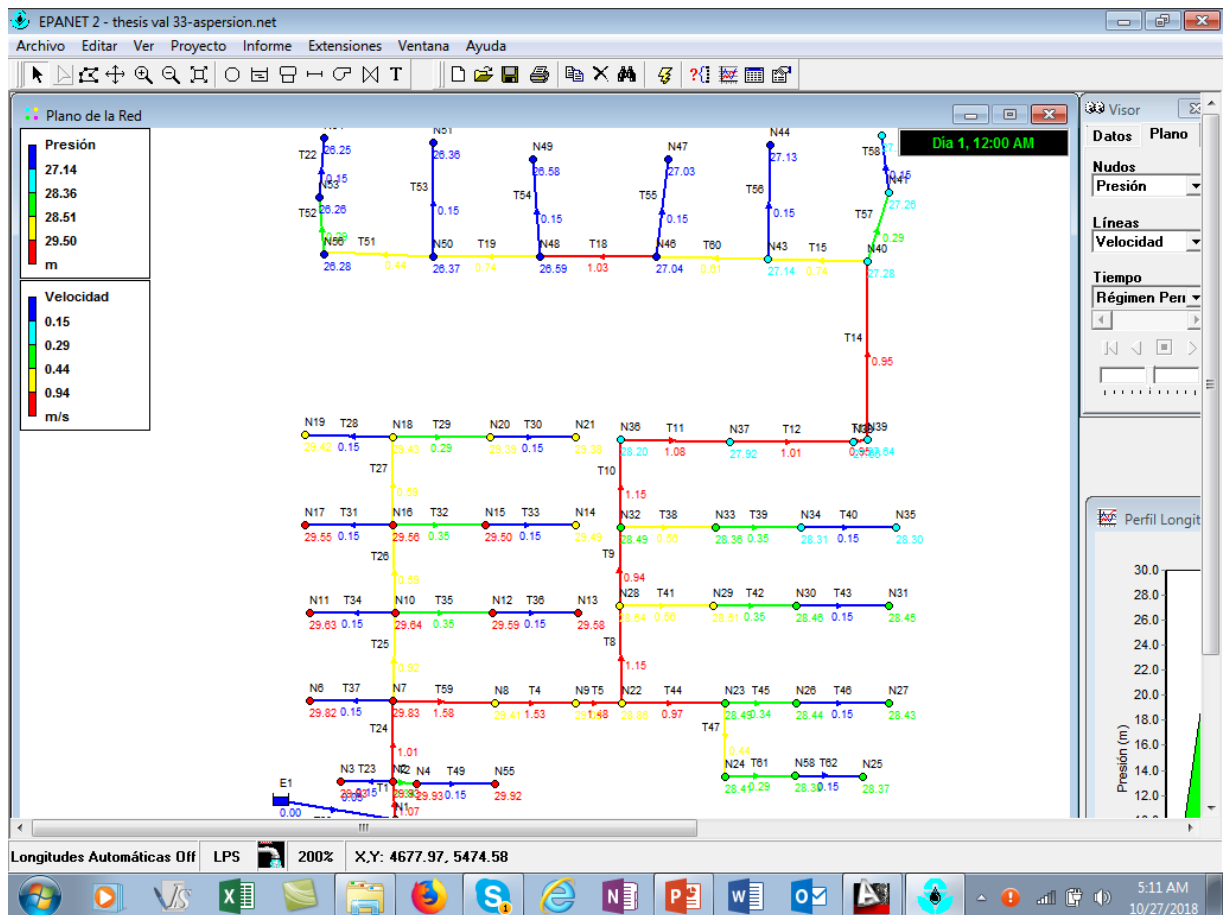


Figura 63: Presiones y velocidades de la subunidad 33, utilizando rotores.

4.4.6 Evaluación hidráulica de las subunidades de riego por goteo

La utilización del riego por goteo subterráneo en las áreas verdes urbanas presentó una mejor uniformidad de riego y ahorro energético con respecto al riego por aspersión. Los goteros auto compensados modelo XFS Rain Bird, requiere una presión mínima de trabajo de 6 m.c.a, el rango de presiones de trabajo del emisor varia de 6 a 41.4 m.c.a. Debido a la escasez de agua existente que se agravará en los próximos años, una nueva fuente de agua para el riego será las aguas servidas tratadas, se puede utilizar el riego por goteo subsuperficial, donde el usuario no estará en contacto con el agua durante el riego, con el beneficio de obtener un coeficiente de uniformidad del 94 % y altas eficiencia de aplicación.

En la Cuadro 30 y Figura 64, se presenta las opciones de gotero XFS Rain Bird, con caudales de 2.3 l/hr y 1.6 l/hr, instalados a una profundidad de 15 cm, con sus respectivos espaciamientos de laterales, espaciamientos de goteros, velocidades de aplicación, caudal /

ha, tiempos de riego y metros lineales de manguera por hectárea. La opción más económica corresponde al gotero de 1.6 l/hr, velocidad de aplicación de 8.75 mm/hr, caudal 24.31 l/s -ha, 25,000 ml/ha y 54,704 goteros/ha. En el Anexo 4, se presenta las especificaciones técnicas del gotero XFS Rain Bird.



Figura 64: Sistema de riego por aspersión y goteo subterráneo.

Cuadro 30: Opciones de riego por goteo subterráneo.

Caudal del gotero (l/hr)	2.3	2.3	1.6	1.6
Esp.laterales (m)	0.4	0.4	0.4	0.4
Esp.gotreros (m)	0.3	0.4	0.3	0.5
Vel.aplicación (mm/hr)	19.2	14.4	13.3	8.0
Caudal (l/s-ha)	191.7	143.8	133.3	80.0
Caudal (m3/s -ha)	53.2	39.9	37.0	22.2
Lámina bruta(mm)	4.0	4.0	4.0	4.0
Tiempo de riego (minutos)	12.5	16.7	18.0	30.0
Metros lineales/ ha	25000.0	25000.0	25000.0	25000.0
Goteros / ha	83333.3	62500.0	83333.3	50000.0

Considerando el riego por goteo subterráneo, en la Figura 65 se presenta el diagrama de pérdidas de carga de la válvula 33, se determinó una pérdida de carga de 1.96 m, si la presión de trabajo del gotero es de 8 m.c.a, se consideró 2 m.c.a adicionales por encima del mínimo. La presión requerida en la válvula será de 10 m.c.a, que es el 30 % de la presión de trabajo en la válvula cuando se utiliza rotores (33.25 m.c.a).

La configuración de la red interna de la subunidad del riego por goteo subterráneo deberá ser cerrada (loop) para tener una mejor distribución de presiones y la facilitar la limpieza conjunta de los laterales de riego enterrados con válvulas de drenaje. El césped americano es una planta resistente a las sales, soportando hasta 15 mmhos/cm en el suelo, sin embargo, el sistema de riego por aspersión se deberá conservar porque nos permitirá el

lavado de sales solubles que se puede presentar en los primeros 15 cm del suelo, debido al clima árido, sin precipitaciones que tiene la zona de estudio. Considerando una conductividad eléctrica del agua de 0,49 mmhos/cm, y una conductividad eléctrica del extracto de saturación suelo de 5 mmhos/cm, se requiere una lámina de lavado de 4,9%, que equivale a 40 mm/año para mantener el balance de sales en el perfil del suelo.

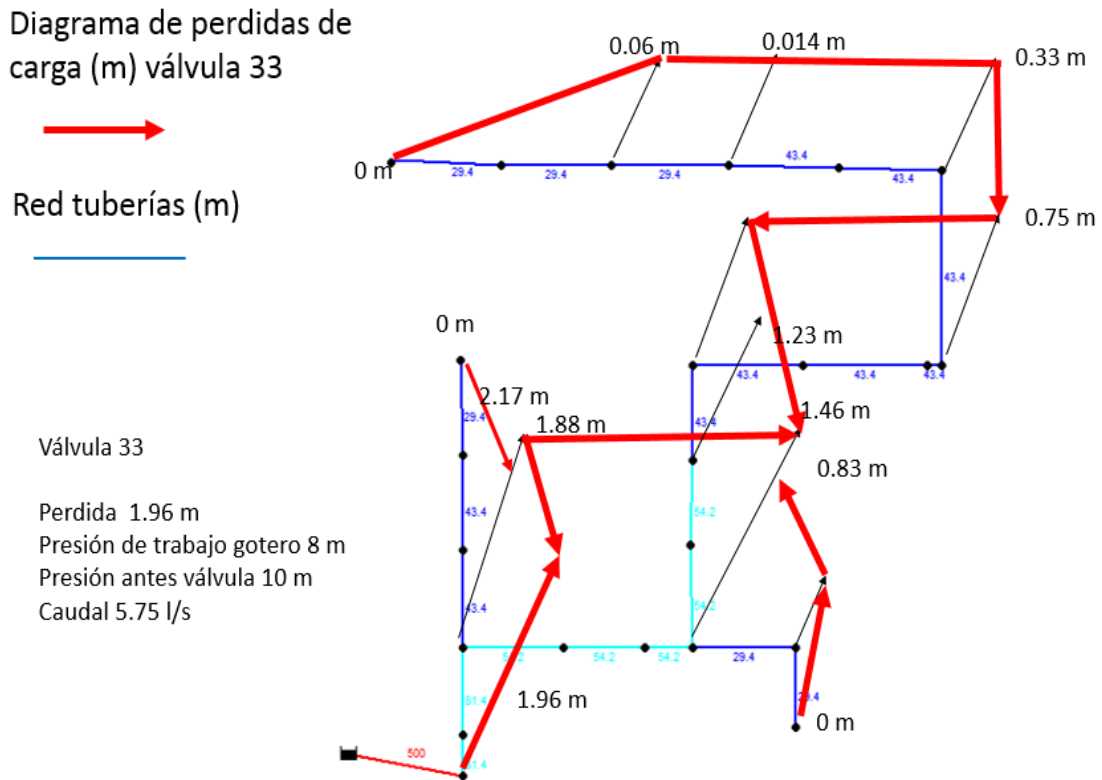


Figura 65: Diagrama de pérdidas de carga de la subunidad 33, utilizando RGS.

4.4.7 Coeficiente de uniformidad y eficiencia de aplicación

La subunidad que controla la válvula 33 tiene forma irregular, con presencia de árboles. Al interior de la subunidad se instalaron 48 rotores de la serie 5000 de Rain Bird, cuya presión de trabajo fue de 30 m.c.a. El tiempo de cada ensayo para la evaluación de la DU fue de 30 minutos, una velocidad de aplicación promedio de 8 mm/hr y se realizaron mediciones de la velocidad del viento entre 0.2 y 0.5 m/s.

Se evaluaron dos métodos para determinar los coeficientes de DU. En el primer método se determinó la DU en base a las láminas de agua precipitadas sobre una superficie, el valor obtenido del coeficiente evalúa la calidad del diseño del sistema de riego y mantenimiento, altura de plantas (intercepción) y las condiciones climáticas durante la prueba como los

vientos, humedad relativa, temperatura y evaporación, el efecto de arrastre y evaporación de las gotas de agua. Se determinó DU de 75.5 % como promedio de tres ensayos. En la Cuadro 31, se presenta una clasificación de DU y la subunidad evaluada fue clasificada como buena.

En el segundo método para determinar la DU, fue considerando la humedad volumétrica del suelo, y se utilizó el sensor TDR para medir las humedades cuatro horas después del riego, tiempo necesario para que el agua precipitada se redistribuya dentro del perfil del suelo por efecto de las fuerzas mátricas y de gravedad, se obtuvo un DU de 84.8 %, este método considera adicionalmente la distribución del agua en el perfil del suelo considerando la compactación y el estado humedad para suelo. En la Cuadro 31, se presenta una clasificación de DU y la subunidad evaluada fue clasificada como excelente.

Cuadro 31: Clasificación de sistemas de riego por aspersion, en base al DU.

	Excelente	Bueno	Razonable	Malo	Inaceptable
CUC	mayor 90	80 - 90	70 - 80	60 - 70	menos 60
CUD	Mayor 84	68 - 84	52 - 68	36-52	menor 36

Fuente : Flórez Tuta *et al.* (2013)

Se realizó la evaluación de DU en base a láminas de agua, para las diferentes condiciones de viento y emisores reportando los siguientes valores para las áreas verdes urbanas de la UNALM (Alejos Asencio 2018). Ver Cuadro 32.

Cuadro 32: DU bajo diferentes condiciones de viento, emisor y forma de las subunidades.

Emisor	Modelo	DU (%)	Vel. Viento (m/S)
Rotor	3504	53-67	2.6 - 0
Rotor	5000	54 -77	2.78 -0.75
Rotor	Falcon	54 -80	4.7 - 0
Difusor	VAN	35 -50	1.61 - 0.8

Fuente : Alejos Asencio (2018)

Se observa que valores superiores de DU al 75 %, se obtienen con los rotores para condiciones de viento bajos. El incremento de la DU de los difusores VAN será necesario cambiarlos por los difusores HEVAN, difusores de alta eficiencia debido a su diseño.

Se presentaron los siguientes escenarios de eficiencia de riego en base al manejo del agua, se consideró el tiempo de riego, los coeficientes hídricos del suelo, humedad del suelo actual, velocidad de aplicación del aspersor, tiempo de riego y el coeficiente de distribución de uniformidad. Para el ejemplo se consideró una DU de 74 %, una velocidad del viento de 0.1 m/s y no se presentó escorrentía, En el Cuadro 33, se presentan los escenarios de eficiencia de riego utilizando riego por aspersión.

Cuadro 33: Escenarios de eficiencia de riego.

Escenarios de operación	Deseado	Deficit de riego	Percolacion
	Riego	sub irrigacion	sobre irrigacion
Profundidad de raices (mm)	120	120	120
Humedad inicial (m3/m3)	21	21	21
Humedad capacidad de campo (m3/m3)	24	24	24
Humedad punto de marchitez (m3/m3)	10	10	10
Agua total disponible (mm)	16.8	16.8	16.8
Lamina de agua neta reponer (mm)	3.6	3.6	3.6
Velocidad de aplicacion (mm/hr)	8	8	8
Velocidad del Viento (m/s)	0.1	0.1	0.1
Distribucion de uniformidad (%)	74	74	74
Tiempo de riego (hr)	0.6	0.3	1.2
Lamina bruta (mm)	4.9	2.4	9.6
Eficiencia de aplicación (%)	73.8	100 (*)	37.5
Deficit / exceso de agua (mm)	1.3	-1.2	6.0
(*) Cálculo numérico 150 (Riego deficitario)			

a) Riego deseado, el tiempo de riego de 0,6 horas, se obtuvo una eficiencia de riego del 73.8 %, una eficiencia de almacenamiento del 100 %, debido a la reposición de la lámina hasta alcanzar la capacidad de campo, existe exceso de agua de 1.3 mm. La lámina de 4.9 mm, que garantiza una lámina mínima de 3.6 mm, a las áreas donde se presenta el cuarto inferior cuando para la DU 75 %.

b) Sobre riego, presentó percolación profunda debido a un tiempo mayor del riego de 1.2 horas, se obtuvo una eficiencia de aplicación del 37.5 %, una eficiencia de almacenamiento del 100 % y un exceso de lámina aplicada de 6 mm con un DU de 75%.

c) Sub riego o riego deficitario fue debido a un menor tiempo de riego de 0.3 horas, se obtuvo una eficiencia de aplicación 100 % (numéricamente 150 %), una eficiencia de almacenamiento del 49.3 %, y no se repuso la lámina de agua en su totalidad para la profundidad de raíces de 120 mm, existe un déficit de -1,2 mm de lámina y con DU de 75%. La eficiencia de riego puede variar en cada riego, una herramienta para una mejor gestión del agua de riego se presenta cuando el sistema esta automatizado y manejado por telecontrol porque permite obtener eficiencias de riego deseadas, además de operar el sistema desde cualquier lugar y hora, para poder regar en las horas de viento bajo, bajas temperaturas y altas humedades relativas, estas características climáticas que se presentan en las noches y madrugadas. Una condición importante es que el riego deberá ser uniforme antes de ser eficiente.

En la Cuadro 34, se presenta una estimación de la eficiencia de riego a nivel mensual, calculada en base a la evapotranspiración potencial mensual, considerando los coeficientes del cultivo obtenidos con el lisímetro y los volúmenes medidos en el cabezal mediante una válvula volumétrica del sistema de riego por aspersión para el año 2016 - 2017.

En el sistema de riego se presentaron los tres casos anteriormente descritos, el riego deseado con eficiencias de riego entre 55% y 86 %, se presenta cuando existe suficiente agua en los reservorios y se cumple la programación de riego, se presentó en los meses de octubre, noviembre, febrero y junio con valores de eficiencia de 56.22%, 60.13 %, 85.95 % y 62.2 % respectivamente.

El riego deficitario se presentó en los meses de febrero, marzo y abril con valores de eficiencia mayores al 100 %. En la estación de verano se aplicó menor cantidad de agua que la requerida por las plantas, fue debido a la falta de agua porque las avenidas del rio Rímac se llevaron la bocatoma rustica existente que se presenta en la Figura 66. La reconstrucción de la toma rustica puede demorar más de 15 días, dependiendo del caudal del rio Rímac, que permita el ingreso de las maquinarias para la reparación. Los reservorios de la UNALM tienen una capacidad de 9000 m³, que nos brinda una autonomía de 10 días, considerando ET_c de 3.84 mm/día en verano, y una eficiencia de riego de 75%.

La sobre irrigación se realizó en los meses de agosto, setiembre, diciembre, mayo y julio con valores de eficiencia de riego 23.73 %, 28.6 %, 54.02%, 52.44% y 52.37 % respectivamente, valores menores a 55%, provocando una percolación lo que permite realizar los lavados de sales y realizar riegos pesados que permiten profundizar las raíces de los árboles para garantizar su estabilidad.

Es necesario la incrementar y /o tener otras fuentes de agua y se proponen las siguientes:

- a) Construcción de una bocatoma en el corto a mediano plazo para evitar el corte el suministro de agua para los usuarios en época de verano.
- b) Explorar nuevas fuentes de agua como el tratamiento de aguas servidas o la perforación de nuevos pozos para extraer aguas subterráneas, a pesar de conocer que la conductividad eléctrica esta alrededor del 3.2 mmhs/cm, como se presenta el actual pozo existente en la UNALM (Pozo Chino), pero se puede bajar la salinidad realizando la mezcla de las aguas del rio Rímac y el agua de pozos, para utilizarlo con plantas con alta tolerancia a las sales como el césped americano, paspalum o bermudas y arboles como el Molle y Huarango entre otros. El lavado de sales del suelo se realizaría en los meses de mayo a octubre utilizando el agua de rio.
- c) No se recomienda la desalinización del agua de pozo, porque aún no se define la forma de evacuar o utilizar la salmuera producto del proceso.



Figura 66: Bocatoma rustica, sector Vitarte.

Cuadro 34: Variación de la eficiencia de riego durante el periodo agosto 2016 - julio 2017.

Año	2016	2016	2016	2016	2016	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	Acum/prom
Mes	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	
Vol. Aplicado.(m3/mes)	8356.70	14548.00	11087.60	15921.00	20203.50	7210.00	18030.90	9362.80	9615.00	13114.90	6000.00	5800.00	139250.40
ETo (mm/día)	0.96	1.52	1.89	2.73	2.69	3.10	3.83	3.84	2.81	1.66	1.05	1.24	2.28
ETo (mm/mes)	29.65	45.62	58.59	81.79	83.49	96.10	107.33	118.98	84.34	51.42	31.48	38.43	827.22
ETo (m3/ha-mes)	296.46	456.21	585.90	817.90	834.90	961.00	1073.30	1189.80	843.40	514.20	314.80	384.30	
Area (ha)	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	
Eto(m3/mes)	4506.12	6934.34	8905.68	12432.08	12690.48	14607.20	16314.16	18084.96	12819.68	7815.84	4784.96	5841.36	125736.86
Coefficiente de cultivo	0.44	0.60	0.70	0.77	0.86	0.94	0.95	0.96	0.91	0.88	0.78	0.52	
ETc(mm/mes)	13.04	27.37	41.01	62.98	71.80	90.33	101.96	114.22	76.75	45.25	24.55	19.98	689.26
Etc(m3/mes) demanda	1982.69	4160.61	6233.98	9572.70	10913.81	13730.77	15498.45	17361.56	11665.91	6877.94	3732.27	3037.51	104768.20
Eficiencia (%)	23.73	28.60	56.22	60.13	54.02	100.00	85.95	100.00	100.00	52.44	62.20	52.37	
Exceso/deficit	6374.01	10387.39	4853.62	6348.30	9289.69	-6520.77	2532.45	-7998.76	-2050.91	6236.96	2267.73	2762.49	
observacion						deficit		deficit	deficit				

4.4.8 Escenarios de balance hídrico

Se presentan diferentes escenarios de la demanda y balance anual, considerando la evolución de los diferentes sistemas de riego pasados, actuales y propuestas para el futuro de las áreas verdes urbanas para ir mejorando su eficiencia de hídrica y energética, se consideró cambios de plantas de menor requerimiento hídrico en el paisaje, cambio del sistema de riego, contar con reservorios, automatización y teledetección para realizar la programación de riego, utilización de variadores de frecuencias para el área de 15.2 ha, una oferta por turno de riego de 150 l/s, cada 7 días y durante 9 horas, desde las 8am a 5pm, durante todo el año.

a) Riego por gravedad por inundación.

- El riego se realizaba durante el día de acuerdo con los turnos de riego asignados por la Junta de Usuarios, no se contaba con reservorios ni estaciones de bombeo, el área verde urbana solamente presentaba una calidad visual adecuada en la mitad del área actual.
- El coeficiente de jardines fue la unidad, el cultivo predominante fue el césped y arboles forestales.
- La eficiencia de riego fue menor al 40 %, por que la topografía de los jardines no tiene pendientes uniformes, los tiempos y láminas de riego fueron muy altos ocasionando inundaciones como por ejemplo frente al rectorado, donde se generaba una laguna que se presenta en la Figura 67a.
- El requerimiento neto y bruto anual fue de 1,082 mm/año y 2,705 mm/año respectivamente y el césped presenta una calidad visual deficiente en parte de las áreas verdes, se consideró el escenario base para realizar las comparaciones. Se necesita un volumen de 411,111 m³/año para las 15.2 ha y se presenta un déficit de agua en 9 meses.

b) Riego por aspersión 1 (situación inicial), presurizado por bombas.

- Se utilizaron reservorios de almacenamiento con capacidades de 9000 m³ (2 unidades) y el riego se realizó en función del requerimiento de agua de las plantas,

clima y disponibilidad de energía a nivel de la universidad, el riego se realizaba durante el día.

- El coeficiente de jardines fue la unidad, el cultivo predominante fue el césped y arboles forestales
- El riego se automatizo utilizando controladores y electroválvulas, la eficiencia de riego estimada fue 70 %, se evitó las inundaciones por efecto del riego y el césped presentó una calidad visual buena como se presenta en la Figura 76b, los jardines frente al rectorado.
- El requerimiento neto y bruto anual fue de 1,082 mm/año y 1,546 mm/año respectivamente y el césped presenta una calidad buena. Se necesita un volumen de 234,920 m³/año para las 15.2 ha, es el 57.14 % con respecto al riego base o gravedad, se presenta un déficit de agua de 5 meses.

c) Riego por aspersión 2, evaluación de DU de los emisores, presurizado por bombas.

- Se utilizaron reservorios de almacenamiento con capacidades de 9000 m³ (2 unidades) y el riego se realizó en función del requerimiento de agua de las plantas, clima y disponibilidad de energía a nivel de la universidad, el riego se realizaba durante el día.
- El coeficiente del césped para verano fue de 0.75 a 0.8, cubre suelos de 0.4 y arboles forestales de 0.3 a 0.6.
- El riego se automatizo utilizando controladores y electroválvulas, se realizó la evaluación de los coeficientes de DU y eficiencia de riego en las áreas verdes de la UNALM, se determinó para el riego por aspersión utilizando rotores fue 75 % y de los difusores fue de 60 %.
- El requerimiento neto y bruto anual para el césped fue de 865 mm/año y 1,154 mm/año respectivamente y el césped presenta una calidad buena. El requerimiento neto y bruto anual para el cubre suelos fue de 433 mm/año y 721 mm/año respectivamente. Se necesita un volumen de 166,406 m³/año para las 15.2 ha, y representa el 40.48 % con respecto al riego por gravedad. No presenta déficit de riego.



Figura 67: a) Riego por gravedad, inundación y b) Riego por aspersión.

- d) Riego por aspersión 3 utilizando telecontrol, presurizado por bombas.
- Se utilizaron reservorios de almacenamiento con capacidades de 9000 m³ (2 unidades) y el riego se realizó en función del requerimiento de agua de las plantas, clima y disponibilidad de energía a nivel de la universidad, el riego se realizaba durante el día y la noche. El riego era nocturno y de madrugada con suficiente disponibilidad de energía, riego era automatizado con controladores y se utilizaba la plataforma IQ could (internet) para el telecontrol.
 - El coeficiente del césped promedio anual fue de 0.65 utilizando los coeficientes de riego, para el cubre suelos de 0.4 y arboles forestales y frutales de 0.3 a 0.6.
 - El riego se automatizó utilizando controladores y electroválvulas, se realizó la evaluación de los coeficientes de DU y se estimó eficiencia de riego para el riego por aspersión utilizando rotores fue 75 % y de los difusores fue de 60 %.
 - El requerimiento neto y bruto anual para el césped fue de 734 mm/año y 978 mm/año respectivamente y el césped presenta una calidad visual buena. El requerimiento neto y bruto anual para el cubresuelos fue de 433 mm/año y 721 mm/año respectivamente. Se necesita un volumen de 143,320 m³/año para las 15.2 ha, y representa el 34.86 % con respecto al riego por gravedad. No presenta déficit de riego.
- e) Riego por aspersión y goteo subterráneo (propuesta), presurizado por bombas.
- Se utilizarán reservorios de almacenamiento con capacidades de 9000 m³ (2 unidades) y el riego se realizará en función del requerimiento de agua de las plantas, clima y disponibilidad de energía a nivel de la universidad, el riego se realizaba durante el día y la noche. En el riego nocturno y madrugada es posible por la suficiente disponibilidad de energía, el riego será automatizado con controladores y la plataforma IQ could (internet) para el telecontrol.
 - El coeficiente para césped será e 0.65 promedio anual utilizando los coeficientes de riego, para los cubre suelos de 0.4 y arboles forestales y frutales de 0.3 a 0.6.
 - El riego será automatizado utilizando controladores y electroválvulas, se evaluarán los coeficientes de DU y se estimarán la eficiencia de riego en las áreas verdes, para

el riego por aspersión utilizando rotores será de 75 % y de riego por goteo subterráneo de 90 %, se aplicará láminas adicionales para el lavado del 10 % de la lámina anual.

- El requerimiento neto y bruto anual para el césped fue de 734 mm/año y 978 mm/año respectivamente. El requerimiento neto y bruto anual para el cubre suelos fue de 433 mm/año y 481 mm/año respectivamente, las áreas que se regaban con difusores se regarían por goteo. Se necesita un volumen de 139,320 m³/año para las 15.2 ha, y representa el 33.89 % con respecto al riego base o gravedad. No presenta déficit de riego, desde el punto de vista de ahorro de agua no es significativo con respecto al escenario anterior.
- f) Riego por goteo subterráneo (propuesta), presurizado por bombas.
- Se utilizarán reservorios de almacenamiento con capacidades de 9000 m³ (2 unidades) y el riego se realizará en función del requerimiento de agua de las plantas, clima y disponibilidad de energía a nivel de la universidad, el riego se realizaba durante el día y la noche. El riego nocturno y madrugada contará con suficiente disponibilidad de energía, riego será automatizado con controladores y se utilizará la plataforma IQ could (internet) para el telecontrol.
 - El coeficiente para césped será de 0.65 promedio anual utilizando los coeficientes de riego, para cubre suelos de 0.4 y arboles forestales y frutales de 0.3 a 0.6.
 - El riego será automatizado mediante controladores y electroválvulas, los coeficientes de DU y eficiencia de riego por goteo subterráneo se estima en 90 %. se requiere laminas adicionales para el lavado del 10 % de la lámina anual.
 - El requerimiento neto y bruto anual para el césped fue de 734 mm/año y 815 mm/año respectivamente. El requerimiento neto y bruto anual para el cubre suelos fue de 433 mm/año y 481 mm/año respectivamente. Se necesita un volumen de 131,865 m³/año para las 15.2 ha, y representa el 32.08 % con respecto al riego por gravedad. No presenta déficit de riego. desde el punto de vista de ahorro de agua no es significativo con respecto a los dos escenarios previos.

Es recomendable realizar pruebas con riego con goteo subterráneo con aguas tratadas, porque será la fuente agua del futuro para las áreas verdes urbanas.

Respecto a los balances hídricos, en el escenario (a) se observa que existió un déficit anual y semanal cuando se utilizaba el riego por gravedad bajo inundación. En el escenario (b), con riego por aspersión no existe un déficit anual de agua, sin embargo, existe un déficit semanal, de noviembre a abril y se debe a la sobre estimación del ks igual a la unidad del césped americano. A partir del tercer escenario no existe déficit de anual ni semanal, debido a los valores menores de ks de los cultivos, utilización de cubre suelos, uso de sistemas de riego por goteo subterráneo mejorando la eficiencia de riego.

En la Cuadro 35 y 36, se presentan las demandas y los balances hídricos para los seis escenarios y en el Anexo 5, se presenta su desarrollo.

Se recomendable disminuir el requerimiento de agua de las áreas verdes urbanas, siendo necesario realizar una arborización para crear microclimas que requieran menos agua.

Cuadro 35: Demanda de agua para diferentes escenarios.

Escenarios	Descripcion	Riego	Eficiencia	Automatizacion	Plantas	KJ	Lam. neta	Lam. bruta	Area	Demanda	Porcentaje	Ahorro base	Ahorro diferencial
			Aplicacion(%)		Dominante		(mm/año)	(mm/año)	(ha)	(m3/año)	(%)	(m3/año)(*)	(m3/año)(**)
a) Gravedad	Sin Reservorios, turnos de riego	Inundacion	40	no	cesped	1	1082	2705	15.20	411111	100		
b) Aspersion 1	Reservorios y Cambio de sistema	Rotores	70	si, controlador	cesped	1	1082	1546	15.20	234920	57.14	176190	176190
c) Aspersion 2	Evaluacion de DU de rotores y difusores	Rotores	75		cesped	0.8	865	1154	13.12	151404			
		Difusores	60		cubre suelos	0.4	433	721	2.08	15002			
									15.20	166406	40.48	244705	68514
d) Aspersion 3	Evaluacion de DU rotores y difusores , KJ promedio de cespced	Rotores	75	si, controlador	cesped+ arboles	0.65	734	978	13.12	128318			
		Difusores	60	IQ cloud	cubre suelos	0.4	433	721	2.08	15002			
									15.20	143320	34.86	267790	23086
e) Aspersion y goteo	Cambio de plantas y riego por goteo subterraneo parcialmente	Rotores	75	si, controlador	cesped+arboles	0.65	734	978	13.12	128318			
		Goteo	90	IQ cloud	cubre suelos	0.4	433	481	2.08	10001			
		Req. Lavado	10 % Lamina					43			1000		
									15.20	139320	33.89	271791	4001
f) Goteo	Cambio de plantas y riego por goteo subterraneo totalmente	Goteo	90	si, controlador	cesped	0.65	734	815	13.12	106932			
		Goteo	90	IQ cloud	cubre suelos	0.4	433	481	2.08	10001			
		Req. Lavado	10 % Lamina					117			14932		
									15.20	131865	32.08	279245	7454
(*) Ahorro con respecto al riego por gravedad, considerando una oferta de caudal constante permanente y confiable													
(**) Ahorro con respecto al escenario previo													

Cuadro 36: Balance hídrico para diferentes escenarios.

Escenarios	Descripcion	Eficiencia	Automatizacion	Plantas	KJ	Lam. bruta	Area	Vol. Agua	Oferta	Balance	Deficit/transferecia(*)
		Aplicacion(%)		Dominante		(mm/año)	(ha)	(m3/año)	(m3/año)	(m3/año)	semanal
a) Gravedad	Sin Reservorios, turnos de riego	40	no	cesped	1	2705	15.20	411111	233280	-177831	Deficit 10 meses, agosto a mayo
b) Aspersión 1	Reservorios y cambio de sistema	70	si, controlador	cesped	1	1546	15.20	234920	233280	-1640	Deficit 5 meses, diciembre -abril
c) Aspersión 2	Evaluacion de DU de rotores y difusores	75	si, controlador	cesped	0.8	1154	13.12	151404			
		60		ubre suelos	0.4	721	2.08	15002			
							15.20	166406	233280	66874	Transferencia
d) Aspersión 3	Evaluacion de DU rotores y difusores , KJ promedio de cesped	75	si, controlador	cesped+arboles	0.65	978	13.12	128318			
		60	IQ cloud	ubre suelos	0.4	721	2.08	15002			
							15.20	143320	233280	89960	Transferencia
e) Aspersión y goteo	Cambio de plantas y riego por goteo subteraneo parcialmente	75	si, controlador	cesped+arboles	0.65	978	13.12	128318			
		90	IQ cloud	ubre suelos	0.4	481	2.08	10001			
		10 % Lamina						1000			
							15.20	139320	233280	93960	Transferencia
f) Goteo	Cambio de plantas y riego por goteo subteraneo totalmente	90	si, controlador	cesped	0.65	815	13.12	106932			
		90	IQ cloud	ubre suelos	0.4	481	2.08	10001			
		10 % Lamina						14932			
								15.20	131865	233280	101415

(*) Agua que se transfiere a otras áreas de la UNALM, la cual tiene 20 ha de áreas verdes urbanas y 80 ha agrícolas.

4.5 EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EMISIÓN DE CO₂

Se evaluó la energía ahorrada, la eficiencia energética y la emisión del CO₂ del sistema de bombeo considerando los siguientes escenarios:

- Situación presente con paisaje actual (Escenario Aspersión 1), utilizando el sistema de riego por aspersión automatizado y tele controlado con la plataforma Rain Bird IQ Cloud, y una estación de bombeo que utiliza un motor a velocidad constante.
- Situación mejorada considerando un cambio de paisaje (Escenario Aspersión 2), que involucra la selección de plantas de bajo y/o medio requerimiento de agua, sometidas a estrés controlado para aplicar menores volúmenes de agua y tiempos de riego. El sistema de riego por aspersión es automatizado y tele controlado con la plataforma Rain Bird IQ Cloud. La estación de bombeo cuenta con un variador de frecuencia, que permitió cambiar las velocidades del motor de acuerdo con la demanda de los turnos de riego. En la sección 4.4 se desarrolló la propuesta para zonificación de las plantas a implementar de menor requerimiento hídrico.

4.5.1 Operación del sistema de riego

Para la programación de riego se realizó considerando la evapotranspiración obtenida de la estación agroclimática Davis. En la automatización del sistema de riego, se utilizó los controladores ESP-LXD y ESP-LXME, y para el telecontrol se utilizó la plataforma Rain Bird IQ Cloud, que permitió la activación o desactivación del motor y electroválvulas.

El controlador ESP-LXD, utilizó el mono cable que permite transmitir la señal eléctrica e información desde el controlador a los decodificadores para abrir o cerrar las válvulas. Se controla 25 turnos, de los cuales en 14 turnos agrupan 4 válvulas/turno para el riego, se utilizan rotores de la serie 3500 (½") y 5000 (¾ ") con velocidades de aplicación alrededor de 8 mm/hr para el riego de círculo completo de los rotores. Los 11 turnos restantes agrupan 3 válvulas/turno para el riego, utilizando difusores con velocidades de aplicación de 40 mm/hr. En el Cuadro 37, se presentan los primeros 14 turnos, con sus válvulas, decodificadores y caudales, además de los 11 turnos con sus válvulas, decodificadores y caudales, controladas por el controlador ESP_LXD.

El controlador ESP-LXME, utilizó el sistema convencional sin decodificadores y maneja 5 turnos, que agrupa de 3 a 4 válvulas/ turno, con rotores Falcon 6508 de 1", las velocidades

de aplicación varían de 9 a 10 mm/hr, cuando el rotor riega el círculo completo. En el Cuadro 38, se presentan 5 turnos, sus válvulas, decodificadores y caudales manejados por el controlador ESP_LXME. El Anexo 6, se presenta las principales características los programadores, electroválvulas y decodificadores.

Cuadro 37: Controlador ESP_LXD, turnos, válvulas y caudales.

CONTROLADOR ESP-LXD				
	Nº Válvula campo	Serie decodificador	Caudal /válvula (L/s)	Caudal / Turno (L/s)
1	1	FD-401	4.77	19.00
	2	FD-401	4.02	
	3	FD-401	6.31	
	4	FD-401	4.96	
2	5	FD-401	4.96	26.00
	41	FD-101	6.32	
	6	FD-102	7.44	
3	7	FD-401	6.18	26.80
	9	FD-401	6.16	
	8	FD-401	7.16	
4	14	FD-401	7.19	27.00
	15	FD-101	8.01	
	10	FD-401	7.98	
5	12	FD-401	7.34	26.00
	13	FD-102	7.14	
	16	FD-101	5.49	
6	17	FD-101	5.18	27.00
	18	FD-102	5.46	
	21	FD-101	7.51	
7	22	FD-401	7.06	26.20
	23	FD-102	6.75	
	24	FD-401	7.71	
8	46	FD-102	10.03	27.60
	19	FD-401	2.31	
	25	FD-401	4.69	
9	27	FD-102	6.47	24.60
	28	FD-102	5.76	
	26	FD-401	6.79	
10	33	FD-101	6.09	25.90
	42	FD-401	7.05	
	29	FD-401	7.19	
11	31	FD-101	7.82	26.70
	35	FD-401	6.34	
	30	FD-401	5.66	
12	32	FD-101	7.57	30.00
	36	FD-101	7.29	
	37	FD-401	8.52	
13	39	FD-401	6.74	27.00
	40	FD-401	3.58	
	43	FD-401	7.83	
14	44	FD-401	8.22	27.00
	45	FD-102	5.99	
	47	FD-102	6.73	
15	48	FD-102	4.91	27.00
	49	FD-102	11.76	
	56	FD-102	5.98	
16	57	FD-102	6.83	27.00
	70	FD-401	5.98	
	64	FD-102	7.85	
17	68	FD-401	7.85	27.00
	65	FD-401	7.85	
	66	FD-401	7.85	
18	67	FD-401	7.85	27.00
	71	FD-401	4.27	
	72	FD-101	4.97	
19	73	FD-101	4.97	27.00

<< Continuación >>

Turnos	Nº Válvula campo	Serie decodificador	Caudal /válvula (L/s)	Caudal / Turno (L/s)
15	3	FD-401	4.02	21.30
	74	FD-401	10.07	
	75	FD-102	8.56	
16	85	FD-401	7.90	23.90
	76	FD-401	11.23	
	77	FD-401	7.34	
17	80	FD-401	10.64	26.00
	78	FD-401	9.36	
	79	FD-401	6.63	
18	81	FD-401	14.73	25.60
	82	FD-401	9.02	
	83	FD-401	6.27	
19	84	FD-401	6.17	25.50
	86	FD-102	8.80	
	88	FD-101	9.33	
20	93	FD-401	8.80	24.80
	87	FD-401	9.31	
	89	FD-401	7.24	
21	91	FD-102	8.26	26.70
	92	FD-102	10.50	
	98	FD-401	5.83	
22	99	FD-401	6.39	28.00
	94	FD-401	10.01	
	95	FD-401	8.26	
23	90	FD-401	7.74	24.40
	96	FD-401	8.66	
	97	FD-102	7.57	
24	105	FD-102	10.71	24.60
	100	FD-102	7.36	
	101	FD-102	7.30	
25	104	FD-101	8.86	25.50
	103	FD-102	6.20	
	106	FD-102	8.22	

Cuadro 38: Controlador ESP_LXME, turnos, válvulas y caudales.

Turnos	Nº Válvula campo	Serie decodificador	Caudal /válvula (L/s)	Caudal / Turno (L/s)
26	51	CABLEADO	6.87	27.47
	52	CABLEADO	6.87	
	116	CABLEADO	6.87	
	69	CABLEADO	6.87	
27	58	CABLEADO	6.83	18.79
	59	CABLEADO	5.98	
	60	CABLEADO	5.98	
28	61	CABLEADO	5.98	17.93
	62	CABLEADO	5.98	
	63	CABLEADO	5.98	
29	112	CABLEADO	6.83	29.04
	115	CABLEADO	7.69	
	113	CABLEADO	7.69	
	114	CABLEADO	6.83	
30	50	CABLEADO	8.54	22.24
	53	CABLEADO	6.83	
	54	CABLEADO	6.87	

4.5.2 Sistema de bombeo sin variadores de frecuencia, $K_j = 1$ y emisión de CO_2 .

En la Figura 68, se presentan los 30 puntos de operación de la bomba que corresponde a cada turno de riego, la curva de altura dinámica total (m.c.a), la curva de eficiencia de la bomba y curva de potencia (HP) de la bomba, marca Hidrostral, modelo B08M-H. La bomba tiene un diámetro del impulsor de 149.2 mm, con 8 etapas, cada etapa proporciona una de presión de 9 m.c.a para un caudal de 23.5 l/s en el punto de máxima eficiencia de la bomba de 80 %, para la velocidad de giro de la bomba de 1750 rpm, con una linterna es de 6"x16 ^{1/2}", el motor tiene una potencia de 30 HP. Las curvas de altura dinámica y eficiencia obedecen a unas curvas polinómicas de segundo grado y la curva de potencia obedece a una ecuación de regresión lineal como se presenta en la Figura 68.

En la Cuadro 39, se desarrollaron los cálculos de los puntos de operación de la bomba de los 30 turnos de riego, con sus respectivas alturas dinámicas totales en curva de la bomba, caudales, altura requerida por turno, áreas de riego, cuando la bomba trabajó con una velocidad de giro constante de 1750 rpm. El costo por kilo vatio hora fue de S/0.2 / kW h,

que permitió evaluar los costos energéticos, eficiencia energética y emisión de CO₂. En el Anexo 7, se presenta las curvas de la bomba y placas de la bomba y motor.

- La eficiencia promedio de la bomba fue de 77.16 % para operación de los 30 turnos, con un máximo de 78.91 % y un mínimo de 72.41 %. La eficiencia del motor eléctrico fue de 91.1 %, se obtuvo una eficiencia energética total promedio del sistema de bombeo del 70.30 %, una máxima de 71.89 % y mínima de 65.96 %. El 16.7 % de los puntos de operación están dentro del -10 % y +5 % del punto óptimo de operación de la bomba, rango que es considerado como una excelente práctica en la operación de la bomba. El 33.3 % de los puntos están dentro de -20 % y +10% del punto óptimo operación de la bomba, rango que es considerado una mejor práctica de operación de la bomba. El 86.6 % de los puntos están dentro del -30 % y +15% del punto óptimo operación de la bomba, rango que es considerado una buena práctica de operación de la bomba. El 13.3 % de los puntos, opera fuera del ultimo rango, y considerado como una mala práctica de operación de la bomba, que puede ocasionar el deterioro del sistema de bombeo provocando la cavitación, corta vida de cojinetes y juntas, recirculación de la descarga y succión y temperaturas altas.
- La sobrepresión promedio proporcionada por la bomba fue de 9.37 m, la máxima fue 21.71 m y mínima fue de 0.26 m. La potencia en acumulada anual fue de 1064.18 HP, con un exceso de 123.43 HP, ocasionando un gasto inútil de energía.
- La lámina bruta de agua por año fue de 1103.41 mm/año para cada turno de riego considerando un coeficiente de jardín unitario, $K_j = 1$ y la eficiencia de riego de 75 %.
- Los costos energéticos anuales ascendieron a 9,737.51 soles; y el exceso de pago debido a las sobrepresiones asciende a S/1,131.6 / año, que representa el 11.6 % del costo de energía anual, para 1,864.89 h/año de operación.
- La emisión de CO₂ debido al motor eléctrico de la estación de bombeo, fue calculada considerando el factor de emisiones para la energía eléctrica de 0.6593 kg CO₂ / kW h, que corresponde a la emisión del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) del 2013 (Ministerio del Ambiente 2016), para tiempo de operación 1,864.89 h/año y 87,560.75 kW h/año, se generó 57.72 tn de CO₂/año.

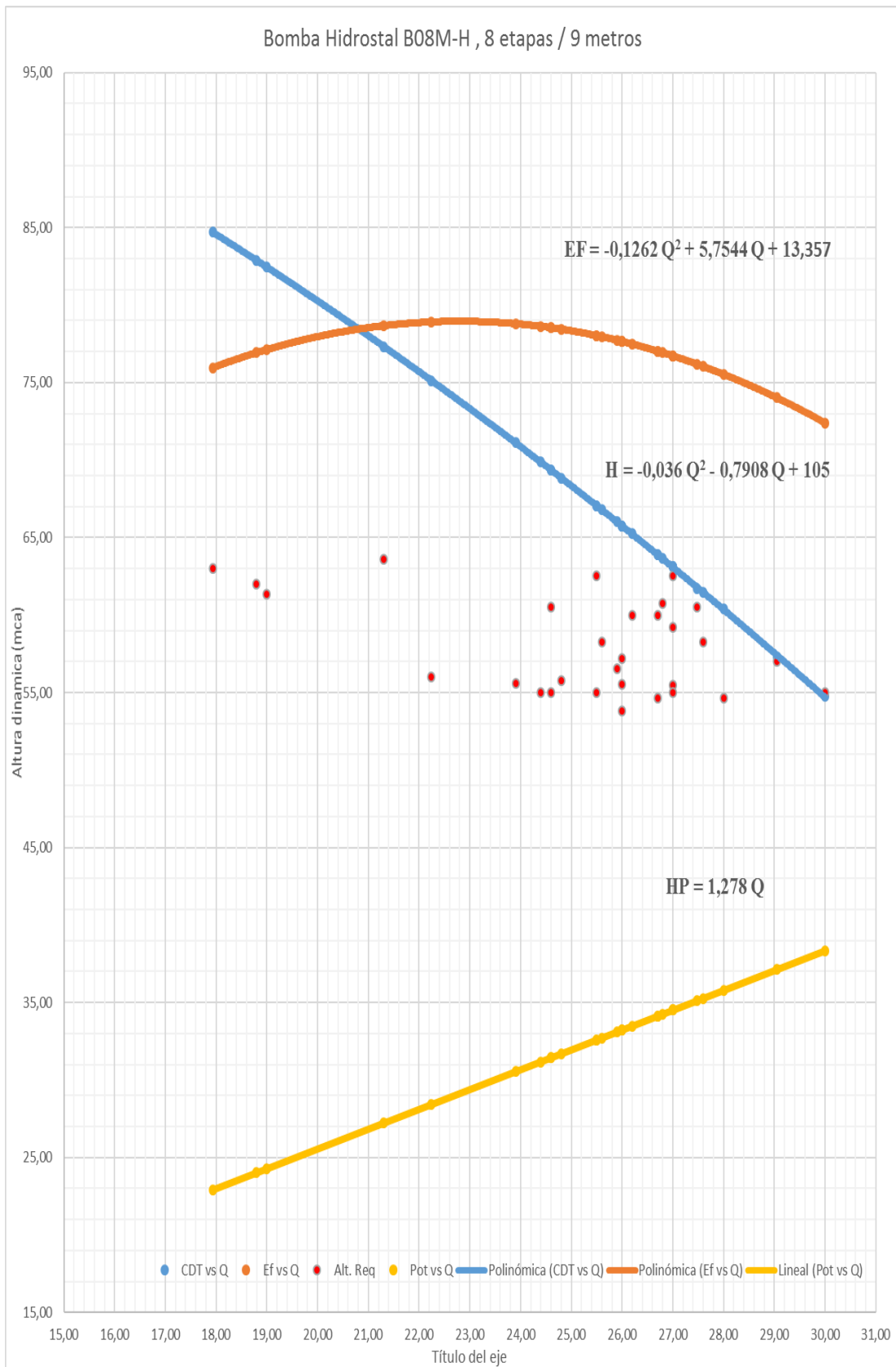


Figura 68: Puntos de operación de la bomba, curvas de altura dinámica total, potencia y eficiencia de la bomba.

4.5.3 Sistema de bombeo utilizando variador de frecuencia, $K_j = 0.8$ del césped, $K_j = 0.4$ del cubre suelos y emisión de CO_2 .

El variadores de frecuencia es un dispositivo electrónico utilizado para el control de los motores eléctricos, el propósito es variar la velocidad del motor mediante la frecuencia y voltaje, permitiendo el ahorro de energía y costos energéticos (Garud *et al.* 2016).

La principal razón para la instalación de los variadores de frecuencia es el ahorro de energía y costos operativos, en los sistemas de riego a presión se presentan los tres casos siguientes (United States Department of Agriculture 2010) :

- a) Requerimiento de presión constante y caudal variable,
- b) Requerimiento de caudal constante y presión variable y
- c) Requerimiento de caudal y presión variables.

En el presente caso se presenta diferentes requerimientos de caudal y presión para turno de riego, que es un punto de operación de la bomba. En la Figura 69, se presentan las curvas de eficiencia, altura dinámica y potencia de la bomba, para las siguientes velocidades: 1750 rpm (60 hz), 1663 rpm (57 hz), 1604 rpm (55 hz) y 1517 rpm (52 hz), que fueron generadas utilizando las ecuaciones de afinidad de bombas. Posteriormente se ploteo los 30 puntos de operación (ADT y Q) de los turnos de riego, para identificar las curvas de altura dinámica total, que mejor se ajustaron a los requerimientos de ADT y Q de los turnos, y evitar las sobrepresiones, favoreciendo el ahorro de energía, menor costo energético y emisión de CO_2 . En el Anexo 8, se presenta los datos que se generaron las curvas de altura dinámica total y potencia de la bomba para las diferentes velocidades expresadas en rpm y/o hercios.

En la Figura 69, se presenta los puntos 30 puntos de operación de los turnos de riego. Los puntos de operación de los turnos que utilizan rotores de serie 3500 y 5000 ($\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$), se ubicaron entre las curvas de 1750 rpm y 1604 rpm (13 de 14 puntos), a excepción de un punto de operación. Los puntos de operación de los turnos que utilizan difusores en se encuentran entre las curvas de 1750 rpm y 1517 rpm, pero la mayoría de los puntos de operación caen entre las curvas de 1604 rpm y 1517 rpm (7 de 11 puntos). Los puntos de operación de los turnos de rotores 6504 (1"), están entre las curvas de 1750 rpm y 1517 rpm. En todos los casos la reducción de la velocidad inicial de 1750 rpm no fue mayor del 13.4 % (1717 rpm), siendo la reducción de velocidad menor al valor permisible del 30 %.

En la Cuadro 40, se presentan los puntos de operación de la bomba de los 30 turnos de riego, con sus respectivas ADT de la bomba, caudales, alturas requeridas por los turnos, áreas de riego, cuando la bomba trabajó en diferentes velocidades de 1750 rpm, 1604 rpm, 1575 rpm y 1517 rpm, cuando se utiliza un variador de velocidades. El costo por kilo vatio hora fue de S/0.2 / kW h, que permitió evaluar los costos energéticos, eficiencia energética y emisión de CO₂. En el Anexo 7, se presentan los valores para generar las curvas de la bomba utilizando las ecuaciones de similitud.

- La eficiencia promedio de la bomba fue de 77.01 % para operación de los 30 turnos, con un máximo de 78.61 % y un mínimo de 72.41 %. La eficiencia del motor eléctrico fue de 91.1 % y 98 % del variador, se obtuvo una eficiencia energética total promedio del sistema de bombeo del 68.75 %, una máxima de 70.18 % y mínima de 64.65 %. La eficiencia promedio de la bomba disminuye ligeramente en 0.3 %, debido a que velocidad disminuyo como máximo a 1517 rpm, es decir el 13.4 % de 1750 rpm, siendo lo permisible hasta 30 - 50 % de 1750 rpm.
- La sobrepresión promedio fue de 2.23 m, la máxima fue 6.191 m y mínima fue de 0 m. La potencia en acumulada anual fue de 873.79 HP, con un exceso de 32.23 HP, presentando un ahorro de potencia.
- La lámina bruta de agua por año fue de 882.73 mm/año, cuando al césped se encuentra con un estrés controlado y asociado con árboles, se utilizó el KJ de 0.8 y la eficiencia de riego de 75 % cuando riega con rotores. La lamina bruta de 551.71 mm/año, fue el requerimiento de los cubre suelos y árboles con un KJ de 0.4 y la eficiencia de riego de 60 % cuando se riega con difusores. La eficiencia de riego en difusores es más baja que los rotores, debido a la menor distribución de uniformidad en las áreas irregulares y/o pequeñas de algunos jardines como se presenta en la Figura 60, además del diseño hidráulico de los difusores VAN. Existen difusores de alta eficiencia, denominados HE VAN, que debido al diseño hidráulico se puede alcanzar hasta el 80 % de distribución de uniformidad.
- Los costos energéticos anuales ascendieron a 6,200.14 soles; y el exceso del pago debido a las sobrepresiones en la bomba asciende a S/ 202.52 / año, que representa el 3.26 % del costo de energía anual, para 1,436.38 h/año de operación. Utilizando el variador de velocidad se ahorra energía y disminuyen los costos operativos.

- La emisión de CO₂ producida por el motor de la estación de bombeo, fue calculada utilizando el factor de emisión para la energía eléctrica de 0.6593 kg CO₂ / kW h, que corresponde a la emisión del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) del 2013 (Ministerio del Ambiente 2016), para tiempo de operación 1,436.38 h/año y 55752.31 kW h/año, se generó 36.75 tn de CO₂/año. La emisión CO₂/año disminuyó en 20.97 tn de CO₂/año con respecto al escenario que utiliza un motor sin variador de frecuencia.

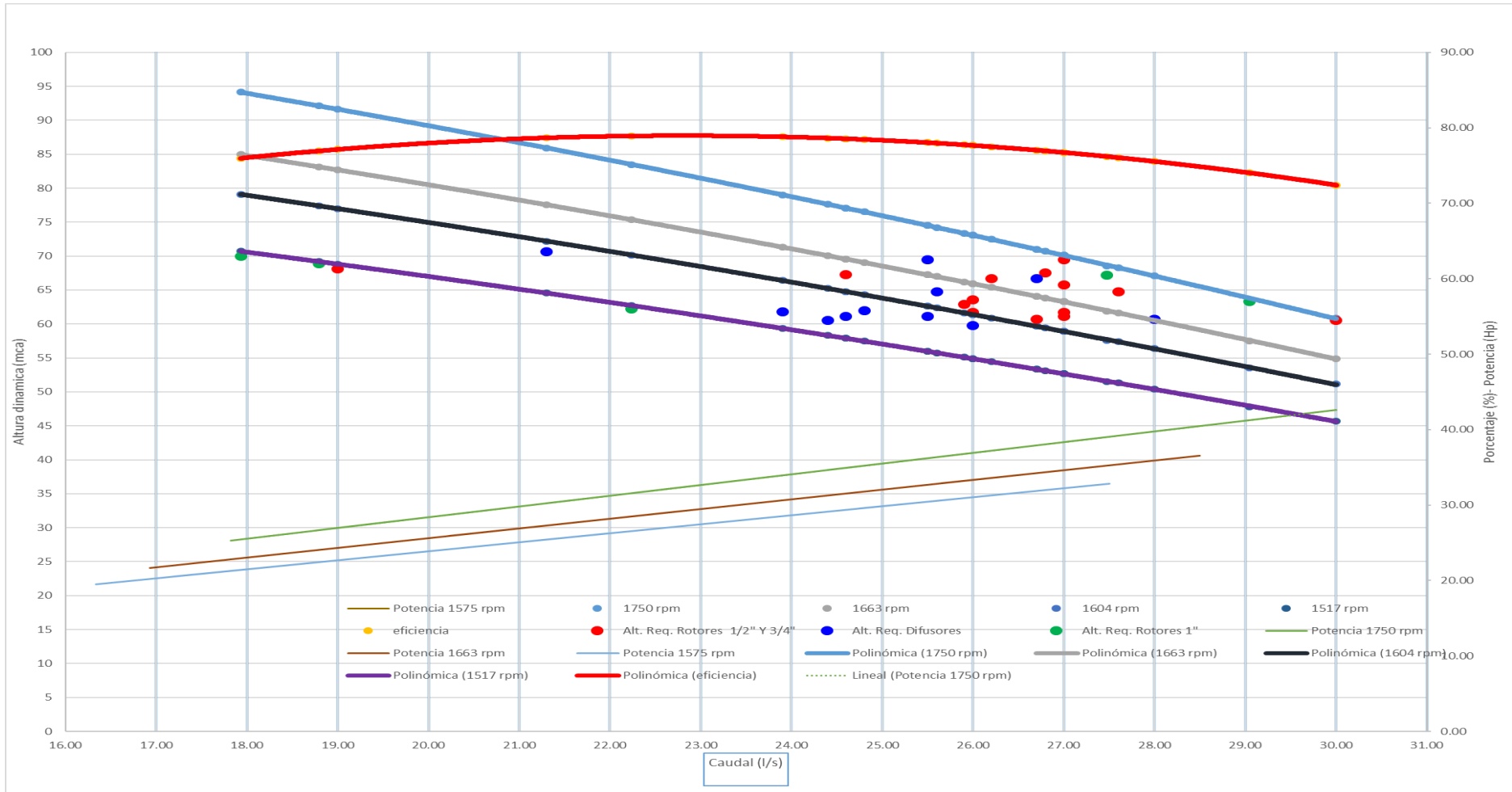


Figura 69: Curvas de la ADT, potencias y eficiencia de la bomba con variadores de velocidades.

Cuadro 40: Eficiencia energética y emisión de CO₂ utilizando variadores de frecuencia.

Rotores/ difusoes	TURNO	Caudal	CDT	Eficiencia	Altura requerida	Sobre- presión	Potencia bomba + Motor	exceso de potencia bomba + motor	Área/turno	Lámina bruta anual	Costo adicional	Costo total	h/año	kW h/año	Kg CO ₂ / año
		l/s	m	%	m	m	Hp	Hp	ha	mm	S/año	S/año			
3500/5000	1	19.00	61.93	76.80	61.32	0.61	22.58	0.22	0.88	882.73	3.78	381.91	113.50	3434.17	2264.15
3500/5000	2	26.00	59.35	77.46	57.21	2.14	29.36	1.06	0.79	882.73	11.69	324.61	74.20	2918.92	1924.45
3500/5000	3	26.80	63.64	76.93	60.74	2.90	32.68	1.49	0.94	882.73	19.19	420.45	86.35	3780.77	2492.66
3500/5000	4	27.00	63.11	76.73	59.19	3.92	32.73	2.03	0.81	882.73	22.35	359.91	73.79	3236.38	2133.75
3500/5000	5	26.00	59.35	77.46	55.55	3.80	29.36	1.88	0.80	882.73	21.18	331.04	75.67	2976.76	1962.58
3500/5000	6	27.00	56.96	76.52	55.50	1.46	29.62	0.76	0.80	882.73	8.20	320.79	72.68	2884.62	1901.83
3500/5000	7	26.20	65.23	77.49	60.00	5.23	32.51	2.61	0.78	882.73	28.47	354.78	73.24	3190.23	2103.32
3500/5000	8	27.60	61.49	76.04	58.28	3.21	32.89	1.72	0.76	882.73	17.34	332.41	67.82	2989.07	1970.70
3500/5000	9	24.60	62.60	78.36	60.52	2.08	28.96	0.96	0.82	882.73	11.69	352.74	81.73	3171.83	2091.19
3500/5000	10	25.90	59.58	77.54	59.58	0.00	29.33	0.00	0.71	882.73	0.00	294.94	67.48	2652.15	1748.56
3500/5000	11	26.70	57.68	76.83	54.65	3.03	29.54	1.55	0.69	882.73	14.61	278.25	63.21	2502.03	1649.59
3500/5000	12	30.00	54.76	72.41	54.50	0.26	33.44	0.16	0.78	882.73	1.51	316.44	63.50	2845.46	1876.01
3500/5000	13	27.00	56.96	76.52	55.00	1.96	29.62	1.02	0.64	882.73	8.88	258.51	58.57	2324.53	1532.56
3500/5000	14	27.00	63.11	76.73	62.54	0.57	32.73	0.30	0.45	882.73	1.79	198.43	40.68	1784.29	1176.38
VAN	15	21.30	69.79	78.48	63.60	6.19	27.91	2.47	0.10	551.71	2.56	28.83	6.93	259.25	170.92
VAN	16	23.90	59.75	78.58	55.58	4.17	26.79	1.87	0.13	551.71	2.39	34.30	8.59	308.47	203.37
VAN	17	26.00	55.26	77.42	53.81	1.45	27.35	0.72	0.14	551.71	0.86	33.03	8.11	297.02	195.82
VAN	18	25.60	60.29	77.77	58.29	2.00	29.25	0.97	0.14	551.71	1.18	35.58	8.16	319.93	210.93
VAN	19	25.50	56.35	77.80	55.00	1.35	27.22	0.65	0.15	551.71	0.87	36.51	9.00	328.27	216.43
VAN	20	24.80	57.85	78.22	55.80	2.05	27.03	0.96	0.14	551.71	1.26	35.38	8.78	318.12	209.73
VAN	21	26.70	63.91	77.03	60.00	3.91	32.65	2.00	0.15	551.71	2.50	40.93	8.41	368.02	242.64
VAN	22	28.00	54.50	75.33	54.65	-0.15	29.86	-0.08	0.12	551.71	-0.08	29.12	6.54	261.85	172.64
VAN	23	24.40	58.70	78.40	54.50	4.20	26.92	1.93	0.13	551.71	2.39	33.34	8.31	299.82	197.67
VAN	24	24.60	58.28	78.32	55.00	3.28	26.98	1.52	0.16	551.71	2.21	39.31	9.78	353.45	233.03
VAN	25	25.50	67.06	78.03	62.54	4.52	32.30	2.18	0.17	551.71	3.22	47.75	9.92	429.40	283.10
6504	26	27.47	61.68	76.20	60.50	1.18	32.77	0.63	0.68	882.73	5.64	295.44	60.49	2656.63	1751.52
6504	27	18.79	62.27	76.59	62.00	0.27	22.51	0.10	0.55	882.73	1.06	241.28	71.92	2169.60	1430.42
6504	28	17.93	63.63	75.62	63.00	0.63	22.24	0.22	0.56	882.73	2.49	252.08	76.06	2266.76	1494.47
6504	29	29.04	57.31	74.03	57.00	0.31	33.14	0.18	0.50	882.73	1.13	210.16	42.56	1889.78	1245.93
6504	30	22.24	56.43	78.61	56.00	0.43	23.53	0.18	0.73	882.73	2.15	281.88	80.39	2534.73	1671.15
	Acum./prom	25.29	60.29	77.01	58.06	2.23	873.79	32.23	15.20	761.36	202.52	6200.14	1436.38	55752.31	36757.50
			E. B.Maximo	78.61	Ef. Sist.bombeo máximo	70.18									
			E.B.Promedio	77.01	Ef. Sist.bombeo promedio	68.75		Ef. Motor y variador	89.3						
			E.B.Minimo	72.41	Ef. Sist.bombeo mínimo	64.65									
				1750 rpm			1604 rpm				1575 rpm			1517 rpm	

V. CONCLUSIONES

- Mediante el proceso de análisis jerárquico, se obtuvieron los siguientes coeficientes de riego para el césped americano utilizando RGS: 0.8 ETo; 0.8 ETo; 0.4 ETo y 0.6 ETo, para las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera respectivamente, para el uso eficiente del agua y adecuada calidad visual del césped. El requerimiento anual de agua del césped, con los coeficientes seleccionados, fue de 5,720 m³/ha-año con un ahorro en volumen de agua de 2555 m³/ha-año, que corresponde al 31% con respecto a un coeficiente igual a la unidad del césped. Los valores obtenidos de coeficiente de riego del césped americano representan un ahorro de 38,836 m³/año de agua, para las 15.2 ha de la UNALM, con respecto el valor de coeficiente de riego igual a la unidad. Los coeficientes de riego evaluados para el riego por aspersión bajo condiciones reales de manejo para el periodo de evaluación presentaron valores por debajo del recomendable (0.75-0.8), para los meses de verano y en los demás meses del año se obtuvo valores superiores a 0.6.
- Los valores de coeficiente de cultivo (Kc) para el césped americano (*Stenotaphrum secundatum*), bajo condiciones óptimas de humedad fueron: 0.95, 0.85, 0.52 y 0.78, para las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera respectivamente; presentando en todas las estaciones y meses del año, valores menores a la unidad. Los valores obtenidos de los coeficientes del cultivo de césped americano (Kc) representan un ahorro de 20,760 m³/año de agua para las 15.2 ha de la UNALM, con respecto al volumen de agua obtenido con un valor de Kc igual a la unidad del césped. Los valores obtenidos en los coeficientes de riego son menores que los coeficientes del cultivo de césped (Kc), y fueron obtenidos sometiendo al césped a un estrés controlado, lo que permite un ahorro mayor de agua y de apariencia visual aceptable.
- Se seleccionaron las plantas de bajo requerimiento, como los “cubre suelos”, en las áreas donde actualmente existen césped americano; estas comprenden jardines pequeños o largos y delgados, normalmente se encuentran en forma paralela a las

pistas, que son regadas con difusores, también se podría utilizar el riego por goteo subterráneo y reducir el área de césped en 1.51 ha. Es necesario realizar la siembra de cultivos asociados, de césped o cubre suelos y arboles forestales o frutales, que nos permita ahorrar agua y mejorar el microclima, porque los requerimientos hídricos de los árboles forestales o frutales son menores que el césped. Se realizó la zonificación de las 15.2 ha en función del tipo de uso: paisajista y utilitario (deportivo, productivo, descanso y estudio), se obtuvo el 10% y 90% del área total respectivamente.

- Se evaluó la distribución de uniformidad, utilizando el método de volúmenes de agua, el cual expresa la calidad del diseño y el mantenimiento de un sistema de riego presurizado. Considerando la importancia de la distribución de humedad de agua en el suelo para las plantas, fue necesario evaluar la humedad mediante sensores de humedad portátiles, como el TDR; ambos métodos de volúmenes y de humedad se complementaron para una adecuada evaluación y gestión del sistema de riego. La eficiencia de aplicación de riego depende de muchas variables como la distribución de uniformidad, calidad de agua, resistencia a las sales del cultivo, las variables climáticas, programación de riego, la automatización y el telecontrol; no obstante, la condición necesaria para que el riego sea eficiente, es que sea uniforme. La eficiencia obtenida para el riego por aspersión utilizando rotores, fue de 75 %, utilizando difusores fue de 60% y utilizando goteo subterráneo fue superior del 90%.
- En la situación actual con el sistema de riego por aspersión, la eficiencia promedio de la bomba fue de 77.16 % para la operación de los 30 turnos de riego, la eficiencia del motor eléctrico fue de 91.1 %. Se obtuvo una eficiencia energética total máxima, promedio y mínima de 71.89 %, 70.30 % y 65.96 % respectivamente. La electrobomba de velocidad constante, con una cobertura de césped americano con un K_j de la unidad 1, y para un área de 15.2 ha, se requieren 1,864.9 horas de operación / año y 87,560.75 Kw- hr /año generando una emisión de 57.72 toneladas de CO₂ / año. En la situación mejorada, con una electrobomba con variador de frecuencia, con una cobertura de césped americano y cubre suelos con valores de K_j anuales de 0.75-0.80 y 0.4 respectivamente, para las 15.2 ha, se requieren 1,436.4 horas de operación / año y 55,752 Kwh /año, se generó una emisión de 36,757 toneladas de CO₂/año; esto evidencia un ahorro de energía de 31,808 Kwh /año y de costo energético de \$/.

3,537.37 / año, así como una disminución de emisiones en 20.971 toneladas de CO₂ /año.

VI. RECOMENDACIONES

- Automatizar el lisímetro de drenaje para la obtención de los coeficientes de especie para diferentes plantas de las áreas verdes urbanas.
- Sembrar los cultivos asociados, como el césped americano y arboles forestales o frutales y evaluar la ETj para diferentes condiciones de sombra; es decir con diferentes microclimas.
- Es necesario evaluar nuevas fuentes de agua, como el tratamiento de aguas servidas, para utilizarlas con el riego por goteo subterráneo.
- Evaluar la explotación de agua subterránea salinas, para realizar la mezcla con agua de rio y utilizarlas para el riego de plantas resistentes a las sales.
- Es necesario el uso de drones para determinar el porcentaje de área sombreada generada por los árboles para una mejor evaluación del coeficiente de microclima (Kmc) y el estado de salud del césped y árboles.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdulhussein, HA. 2018. Investigation the stability of treated water produced from six stations in Babylon. *Journal of University of Babylon, Engineering Sciences* 26(1):376-386.

Ahmad, A; Khan, S. 2017. Water and energy scarcity for agriculture: Is irrigation modernization the answer? *Irrigation and Drainage* 66(1):34-44.

Alejos Asencio, C. 2018. Distribucion de uniformidad del agua de riego para diferentes condiciones de viento y aspersores en las areas verdes -UNALM. s.l., Universidad Nacional Agraria La Molina. Peru. Tesis de Ingeniero Agrícola. 79 p.

Allen, R; Pereira, L.; Raes, D; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Roma, Italia, s.e. 323 p.

Alshehhi, A; Khan, I; Said, F; Deadman, M; Alkanjari, S; Ahmad, T. 2010. Evaluation of Warm Season Turfgrass under Different Irrigation Regimes in Arid Region. *Notulae Scientia Biologicae* 2(3):30-38.

Aquafondo. 2015. Lima, mega ciudad en el desierto (en línea). Consultado 10 de diciembre 2016. Disponible en http://aquafondo.org.pe/wp-content/uploads/2015/11/1._Lima_-_Megaciudad_en_el_Desierto.pdf :1-4. Disponible en <http://www.aquafondo.org.pe/aprende.php>.

Arunjyoti, S; Senapati, S; Adamala, S. 2016. A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems. *African Journal of Agricultural Research* 11(8):683-692.

Arviza, J. 2002. *Ingenieria Rural : Hidraulica*. Primera ed. Universidad Politécnica de

Valencia (ed.). Valencia, España, Universidad Politécnica de Valencia. 386 p.

Asgarzadeh, M; Vahdati, K; Lotfi, M; Arab, M; Babaei, A; Naderi, F; Pir Soufi, M; Rouhani, G. 2014. Plant selection method for urban landscapes of semi-arid cities (a case study of Tehran). *Urban Forestry & Urban Greening* 13(3):450-458.

Ayars, JE; Fulton, A; Taylor, B. 2015. Subsurface drip irrigation in California-Here to stay? *Agricultural Water Management* 157:39-47.

Bastug, R; Buyuktas, D. 2003. The effects of different irrigation levels applied in golf courses on some quality characteristics of turfgrass. *Irrigation Science* 22(2):87-93.

Bell, GE; Martin, DL; Koh, K; Han, HR. 2009. Comparison of turfgrass visual quality ratings with ratings determined using a handheld optical sensor. *HortTechnology* 19(2):309-316.

Bolund, P; Hunhammar, S. 1999. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics* 29(2):293-301.

Bourziza, R; Hammani, A; Kuper, M; Bouaziz, A. 2014. Water saving in arid regions : comparison of innovative techniques for irrigation of young date palms. *International Journal of Enviomental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* 8(11):771-776.

Buesa Pueyo, I. 2013. Determinación del estado hídrico del suelo mediante sensores FDR en Vid cv. Moscatel de Alejandría regada por goteo. Tesis de grado de maestría.España. s.l., Universidad Politecnica de Valencia. 85 p.

Cathey, SE; Kruse, JK; Sinclair, TR; Dukes, MD. 2013. Transpiration and visual appearance of warm season turfgrasses during soil drying. *Environmental and Experimental Botany* 89:36-43.

Cepex 2018. Catalogo de riego. 308p.

Cifuentes Meza, A. 2016. Requerimiento de agua para el cesp ed americano (*Stenotaphrum secundatum*) empleando riego por goteo subterr aneo, durante el oto no en la UNALM. Tesis de Ingeniera. Perú. s.l., Universidad Nacional Agraria, La Molina. Perú. 163 p.

Colmer, TD; Barton, L. 2017. A review of warm-season turfgrass evapotranspiration, responses to deficit irrigation, and drought resistance. *Crop Science* 57:S-98-S-110.

Comunidad de Madrid. 2012. Guía de gestión energética en zonas verdes y campos de golf. s.l., España. 257 p.

Corominas, J. 2010. Agua y energía en el riego, en la  poca de la sostenibilidad. *Ingeniería del agua* 17(3):219-233.

Costello, LR; Matheny, NP; Clark, JR; Jones, KS. 2000. A Guide to Estimating Irrigation Water Needs of Landscape Plantings in California. The Landscape Coefficient Method and WUCOLS III. University of California Cooperative Extension. California Department of Water Resource. (en línea). s.l., s.e. 150 p. Disponible en <http://www.water.ca.gov/wateruseef?ciency/docs/wucols00.pdf>.

Darko, RO; Shouqi, Y; Junping, L; Haofang, Y; Xingye, Z. 2017. Overview of advances in improving uniformity and water use efficiency of sprinkler irrigation. s.l., s.e., vol.10. p. 1-15.

Davis instrumens. 2002. Manual de la consola Vantage Pro. s.l., s.e. p. 64.

Díaz, C; Zamora, E; León, M. 2012. Efecto del coeficiente de estrés hídrico sobre los rendimientos del cultivo de cebolla. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 21(4):42-47.

Ehleringer, J; Cerling, T. 2002. C3 and C4 Photosynthesis James. *In Munn, T;   (eds.)*. s.l., s.e., vol.2. p. 186–190.

Eisenberg, B; Nemcova, E; Poblet, R; Stokman, A. 2014. Estrategia de Infraestructura Ecológica de Lima. 1ra Edición. Universidad de Stuttgart, Alemania, s.e. 321 p.

Figueroa Asencios, R. 2019. Selección, zonificación de plantas y programación de riego para el ahorro de agua en los jardines de la UNALM. s.l., Tesis de Ingeniero Agrícola. Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 144 p.

Flórez Tuta, N; Zution Gonçalves, I; Rodrigues Calvacante, FD; Agnellos Barbosa, EA; Ponciano de Deus, F; Ribeiro, MD; Eiji Matsura, E. 2013. Eficiencia de aplicación de agua en la superficie y en el perfil del suelo en un sistema de riego por aspersión. s.l., s.e., vol.47. 107-119 p.

Fontanier, C; Wherley, B; White, R; Aitkenhead-Peterson, J; Chalmers, D. 2017. Historical ETo-based irrigation scheduling for St. Augustinegrass Lawns in the South-Central United States. *Irrigation Science* 35(4):347-356.

Garud, YY; Gole, SR; Jadhav, RT; Deoghare, SU. 2016. A Study on Variable Frequency Drive and Its Applications. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* (An ISO 5(3):3079-3084.

Gómez, J; Cabrera, J. 2008. El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo De Aplicación. *Scientia Et Technica* XIV(39):247-252.

Grundfos. 2015. Guía de gestión energética en zonas verdes y campos de golf. Madrid, España, s.e. 257 p.

Grundfos bombas. 2018. Bombas con variador de frecuencia incorporado. s.l., s.e. 96 p.

Güngör, A; Arslan, H. 2016. Assessment of water quality in drainage canals of Çarşamba plain, Turkey, through water quality indexes and graphical methods. *Global Nest Journal* 18(1):67-78.

Hidrostral. 2015. Catalogo Hidrostral Soluciones con Tecnologia. s.l., s.e. p. 67.

Instituto para la diversificacion y ahorro de la Energia I. 2005. Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de regadio. Madrid, s.e. 38 p.

Jauregui Vera, M. 2017. Factores de riego en tres especies de césped en las areas verdes de la UNALM. s.l., Tesis de Ingeniero Agrícola. Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 134 p.

Labat, G; Arrastia, P; Gil, E. 2015. Experiencias demostrativas sobre la gestion sostenible del uso del agua de riego, para reducir el gasto energetico y las emisiones de GEI. *In* XXXIII Congreso Nacional de Riegos , Universidad Politecnica de Valencia. Valencia, España, s.e.

Lamm, FR; Bordovsky, JP; Schwankl, LJ; Grabow, GL; Peters, RT; Colaizzi, PD; Trooien, TP; Porter, DO. 2012. 5th Decennial Irrigation Symposium as Paper No. 01-IRR10-9847. *Advance in irrigation* 55(2):483-491.

Litvak, E; Pataki, DE. 2016. Evapotranspiration of urban lawns in a semi-arid environment: An in situ evaluation of microclimatic conditions and watering recommendations. *Journal of Arid Environments* 134:87-96.

Medrano, Hipolito; Bota, Josefina; Cifre, Josep; Flexas, Jaume; Ribas-Carbo, Miguel; Gulias, J. 2008. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geograficas* 43:63-84.

Ministerio del Ambiente. 2016. Guia de ecoeficiencia. Lima, s.e. 287 p.

Monje Jiménez, RJ. 2006. Manejo de céspedes con bajo consumo de agua. 2da edicio. Junta de Andalucia (ed.). Sevilla, España, s.e. 107 p.

Munoth, P; Goyal, R; Tiwari, K. 2016. Sensor based Irrigation System : A Review Sensor

based Irrigation System : A Review. International Journal of Engineering Research & Technology 4(23):86-90.

Natural Resources Conservation Services 2014. Variable Speed Drive (VSD) for Irrigation Pumping. USDA. Water management technical note N 1. (en línea). 36 p. Disponible en http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs144p2_054026.pdf.

Padilla Soldevilla, J. 2016. Coeficientes de cultivo para el césped americano (*Stenotaphrum secundatum*) utilizando lisímetros de drenaje, durante la estación de otoño - UNALM. s.l., Tesis de Ingeniero Agrícola. Perú. Universidad Nacional Agraria, La Molina. 159 p.

Pizarro, F.1996. Riego localizados de alta frecuencia (RLAF) Goteo. Microaspersión y exudación. Tercera edición. Ediciones Muldi-Prensa.513 p.

Puppo, L; García Petillo, M. 2010. Determinación del consumo de agua del duraznero por lisimetría. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 14(1):25-31.

Quichimbo, P; Guamán, J; Cajamarca, M; Aguirre, AJ. 2016. Evaluación del contenido de humedad del suelo por gravimetría y reflectometría. Revista científica Ecuatoriana 4(Especial de Suelos):28-33.

Qureshi, AS. 2014. Reducing carbon emissions through improved irrigation management: A case study from Pakistan. Irrigation and Drainage 63(1):132-138.

RainBird. 2017. El riego automático de espacios verdes. s.l., s.e. 146 p.

Ramírez, W; Hernández, L. 2016. Salinity tolerance in turfgrass species. Pastos y Forrajes 39(4):235-245.

Rodrigues, R; Pitelli, J; Barreto, A; De Andrade, L. 2013. Bermuda grass growth under different water depths. Irriga 18(1):257-269.

Rodríguez, R; Martínez, A; Udaquiola, S. 2014. Gestión ambiental empresarial : cálculo de la huella de carbono en la industria vitivinícola. *Gestion y Ambiente* 17(1):159-172.

Saaty, T. 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences* 1(1):83-98.

Sage, RF. 2014. Photosynthetic efficiency and carbon concentration in terrestrial plants: The C4 and CAM solutions. *Journal of Experimental Botany* 65(13):3323-3325.

SIAR. 2009. Eficiencia energética en instalaciones de riego. *Universidad de Castilla -La Mancha*. . s.l., s.e. 1-8. p.

Straw, C. 2018. Uniformity and spatial variability of soil moisture and irrigation distribution on natural turfgrass sports fields. *Soil and Water Conservation* 73(5):1-28.

Taylor, KS; Anda, M; Sturman, J; Mathew, K; Ho, G. 2006. Subsurface dripline tubing - An experimental design for assessing the effectiveness of using dripline to apply treated wastewater for turf irrigation in Western Australia. *Desalination* 187(1-3):375-385.

Wherley, B; Dukes, MD; Cathey, S; Miller, G; Sinclair, T. 2015. Consumptive water use and crop coefficients for warm-season turfgrass species in the Southeastern United States. *Agricultural Water Management* 156:10-18.

Zhang, C; Pinnix, G; Zhang, Z; Miller, G; Rufty, T. 2017. Evaluation of key methodology for digital image analysis of turfgrass color using open-source software. *Crop Science* 57(2):550-558.

Zhang, J; Bryan Unruh, J; Kenworthy, K. 2015. Turf performance of bahiagrass, centipedegrass, and st. augustinegrass cultivars under a linear gradient irrigation system. *HortScience* 50(3):491-495.

Zhou, Y; Lambrides, C; Fukai, S. 2014. Drought resistance and soil water extraction of a

perennial C4 grass: Contributions of root and rhizome traits. *Functional Plant Biology*
41:505-519.

IX. ANEXOS

Anexo 1: Evapotranspiración potencial y variables climáticas

Mes / Año	Fecha	T Prom (°C)	Velocidad viento (m/s)	Hum. Rel (%)	Rad. Solar (MJ m2/día)	ETo (mm/día)
AGOSTO - 2016	1/08/2016	16.53	0.93	90.04	3.88	1.37
	2/08/2016	15.69	0.83	92.35	1.66	0.66
	3/08/2016	16.02	1.13	88.96	2.53	0.99
	4/08/2016	15.83	0.94	89.92	1.59	0.58
	5/08/2016	15.91	0.83	88.75	2.31	1.01
	6/08/2016	15.87	1.24	89.71	2.48	0.96
	7/08/2016	15.57	0.80	91.75	1.11	0.40
	8/08/2016	15.70	1.15	91.96	2.02	0.75
	9/08/2016	15.94	0.95	90.92	3.06	1.04
	10/08/2016	16.00	0.79	91.50	2.84	1.00
	11/08/2016	15.62	0.82	93.88	2.35	0.79
	12/08/2016	15.54	1.18	93.92	2.20	0.77
	13/08/2016	16.13	1.18	90.96	3.15	1.15
	14/08/2016	15.99	1.47	91.00	3.91	1.37
	15/08/2016	15.28	1.02	93.88	1.14	0.41
	16/08/2016	15.65	1.04	94.25	2.05	0.73
	17/08/2016	16.28	1.23	90.33	4.24	1.52
	18/08/2016	16.13	1.22	90.88	3.83	1.35
	19/08/2016	15.40	0.95	93.88	1.08	0.39
	20/08/2016	15.05	0.87	96.00	1.04	0.37
	21/08/2016	16.39	0.81	90.29	4.13	1.50
	22/08/2016	16.78	0.97	89.46	4.35	1.66
	23/08/2016	16.30	1.02	92.71	2.94	0.98
	24/08/2016	16.16	1.27	93.17	2.41	0.85
	25/08/2016	16.86	1.21	90.75	4.64	1.64
	26/08/2016	15.90	1.16	93.67	2.08	0.78
	27/08/2016	15.68	1.13	94.50	2.12	0.72
	28/08/2016	16.98	0.93	88.50	4.24	1.70
	29/08/2016	16.46	1.34	90.13	3.75	1.35
	30/08/2016	15.42	0.87	94.21	0.95	0.38
	31/08/2016	15.58	0.98	95.46	1.39	0.48
SEPTIEMBRE - 2016	1/09/2016	15.48	1.15	94.08	1.84	0.65
	2/09/2016	16.30	0.94	92.17	3.58	1.28
	3/09/2016	16.26	1.01	92.42	3.91	1.40
	4/09/2016	15.65	1.25	95.13	1.99	0.67
	5/09/2016	15.72	1.15	92.96	2.80	0.97
	6/09/2016	15.63	1.20	92.50	3.85	1.32
	7/09/2016	16.49	1.40	88.17	5.14	2.01
	8/09/2016	15.68	1.53	89.71	3.77	1.42
	9/09/2016	16.25	1.44	87.58	4.91	1.90
	10/09/2016	16.84	1.54	84.96	5.87	2.37
	11/09/2016	16.25	1.57	88.25	5.86	2.22
	12/09/2016	15.49	1.19	90.33	1.40	0.58
	13/09/2016	16.33	1.13	88.75	3.04	1.18
	14/09/2016	16.66	0.99	89.13	5.12	1.85
	15/09/2016	16.37	1.18	92.75	1.97	0.73
	16/09/2016	15.95	0.96	94.75	1.76	0.63
	17/09/2016	17.32	1.26	89.21	5.36	2.03
	18/09/2016	17.78	0.95	88.67	6.32	2.32
	19/09/2016	17.40	1.18	90.33	5.93	2.09
	20/09/2016	16.93	1.28	91.71	5.77	2.04
	21/09/2016	16.34	1.31	93.92	4.05	1.38
	22/09/2016	16.98	1.57	90.96	5.68	2.01
	23/09/2016	16.67	1.48	91.17	4.85	1.65
	24/09/2016	17.51	1.32	89.21	5.59	2.04
	25/09/2016	16.20	1.34	94.38	1.51	0.53
	26/09/2016	17.23	1.19	89.75	5.70	2.08
	27/09/2016	16.94	1.36	89.50	4.66	1.79
	28/09/2016	17.37	1.49	88.75	5.36	2.09
	29/09/2016	16.78	1.37	90.08	1.82	0.87

OCTUBRE-2016	30/09/2016	16.97	1.19	89.63	2.16	0.95
	1/10/2016	17.15	1.57	88.46	4.10	1.70
	2/10/2016	17.56	1.35	89.46	3.84	1.52
	3/10/2016	17.19	1.45	91.83	3.73	1.35
	4/10/2016	16.83	1.30	92.67	2.85	1.05
	5/10/2016	16.52	1.09	90.58	1.85	0.78
	6/10/2016	17.60	1.23	86.33	4.29	1.79
	7/10/2016	17.56	1.25	85.29	5.69	2.33
	8/10/2016	17.05	1.33	87.83	4.55	1.83
	9/10/2016	17.79	1.40	86.54	6.24	2.42
	10/10/2016	18.31	1.26	84.92	6.59	2.66
	11/10/2016	18.11	1.47	86.88	7.23	2.73
	12/10/2016	17.92	1.72	85.54	6.21	2.58
	13/10/2016	17.66	1.50	86.42	4.35	1.92
	14/10/2016	18.21	1.26	83.92	6.47	2.58
	15/10/2016	17.14	1.24	87.67	3.79	1.56
	16/10/2016	18.09	1.41	83.71	4.87	2.16
	17/10/2016	17.80	1.00	86.63	4.48	1.72
	18/10/2016	18.21	1.44	86.42	6.59	2.54
	19/10/2016	18.38	1.29	86.25	6.15	2.41
	20/10/2016	18.23	1.33	88.67	6.00	2.27
	21/10/2016	17.09	1.51	91.04	3.68	1.46
	22/10/2016	17.64	1.52	86.54	6.46	2.54
	23/10/2016	16.97	1.18	89.08	1.59	0.83
	24/10/2016	17.55	1.51	87.25	3.85	1.70
	25/10/2016	17.52	1.00	86.50	3.00	1.28
	26/10/2016	17.87	0.99	86.67	3.76	1.46
	27/10/2016	16.75	1.16	90.17	2.67	1.09
	28/10/2016	17.49	1.56	86.67	4.76	1.99
	29/10/2016	17.65	1.35	85.71	4.94	2.10
	30/10/2016	18.24	1.66	81.92	6.59	2.90
31/10/2016	18.02	1.57	81.63	4.67	2.28	
NOVIEMBRE -2016	1/11/2016	18.02	1.14	82.58	6.80	2.69
	2/11/2016	17.61	0.90	84.63	6.68	2.45
	3/11/2016	17.73	1.02	85.58	7.05	2.66
	4/11/2016	18.04	1.03	85.25	6.16	2.45
	5/11/2016	17.74	1.33	86.58	4.39	1.79
	6/11/2016	17.23	1.15	86.78	2.09	1.06
	7/11/2016	19.08	1.34	79.21	7.35	3.25
	8/11/2016	19.10	1.10	83.38	7.23	2.95
	9/11/2016	19.15	1.09	86.46	7.29	2.74
	10/11/2016	18.94	1.56	86.17	6.81	2.78
	11/11/2016	18.88	1.62	85.75	5.14	2.19
	12/11/2016	19.55	1.32	80.13	7.18	3.14
	13/11/2016	19.35	1.27	84.67	6.50	2.64
	14/11/2016	19.93	1.43	85.71	6.75	2.71
	15/11/2016	19.53	1.43	87.00	4.73	2.10
	16/11/2016	19.50	1.25	84.21	7.03	2.86
	17/11/2016	19.51	1.08	85.21	6.94	2.77
	18/11/2016	19.35	1.10	84.46	7.17	2.91
	19/11/2016	19.18	1.29	84.63	7.04	2.90
	20/11/2016	19.47	1.41	81.63	7.26	3.05
	21/11/2016	20.25	1.32	80.13	7.54	3.30
	22/11/2016	19.90	1.09	84.04	7.59	3.06
	23/11/2016	19.92	1.27	81.75	7.40	3.11
	24/11/2016	19.54	1.06	82.54	7.16	2.89
	25/11/2016	20.13	1.16	81.04	7.26	2.97
	26/11/2016	20.45	1.27	82.63	6.88	2.93
	27/11/2016	19.97	1.22	84.96	6.58	2.72
	28/11/2016	20.35	1.03	83.88	7.03	2.84
	29/11/2016	20.21	1.12	83.88	7.12	2.91
	30/11/2016	20.54	1.26	82.92	7.23	2.97

DICIEMBRE-2016	1/12/2016	19.52	1.03	87.29	4.72	1.89
	2/12/2016	19.84	1.16	85.46	5.48	2.24
	3/12/2016	20.98	1.24	83.21	6.05	2.63
	4/12/2016	20.90	1.25	84.79	7.13	2.95
	5/12/2016	21.15	1.09	83.00	7.31	3.03
	6/12/2016	20.12	0.99	86.08	4.74	1.97
	7/12/2016	20.45	1.16	85.00	6.81	2.75
	8/12/2016	20.40	1.37	85.21	6.41	2.73
	9/12/2016	21.08	1.41	83.71	6.84	2.89
	10/12/2016	20.79	1.11	85.08	6.49	2.70
	11/12/2016	20.70	1.14	83.50	6.87	2.86
	12/12/2016	19.97	1.02	84.04	7.18	2.88
	13/12/2016	19.53	1.33	85.13	6.37	2.59
	14/12/2016	20.50	1.24	82.88	7.33	3.08
	15/12/2016	19.90	0.86	88.46	2.57	1.12
	16/12/2016	20.70	1.14	83.83	6.64	2.83
	17/12/2016	21.26	1.54	82.71	6.56	2.92
	18/12/2016	21.64	1.35	82.00	6.32	2.83
	19/12/2016	21.48	1.31	82.21	6.74	2.95
	20/12/2016	21.48	1.19	81.50	7.16	3.05
	21/12/2016	20.75	0.96	83.71	5.58	2.37
	22/12/2016	21.17	1.05	83.46	3.98	1.87
	23/12/2016	22.23	1.29	80.38	6.95	3.19
	24/12/2016	21.88	1.48	83.63	7.16	3.17
	25/12/2016	22.14	1.35	80.96	7.23	3.28
	26/12/2016	21.71	1.17	83.33	6.80	2.96
	27/12/2016	22.30	1.40	80.54	6.88	3.22
	28/12/2016	22.01	1.07	82.96	5.68	2.54
	29/12/2016	22.21	1.27	80.71	6.06	2.77
	30/12/2016	22.32	1.23	81.58	5.87	2.75
	31/12/2016	22.83	1.10	79.50	4.92	2.48
ENERO -2017	1/01/2017	22.96	1.08	80.04	6.03	2.86
	2/01/2017	21.90	1.28	83.63	6.56	2.84
	3/01/2017	21.87	1.21	83.75	6.72	2.87
	4/01/2017	21.22	1.24	85.92	5.20	2.26
	5/01/2017	23.58	0.96	75.58	5.18	2.53
	6/01/2017	25.83	1.23	64.71	6.46	3.87
	7/01/2017	25.37	1.34	68.83	7.09	3.96
	8/01/2017	22.20	1.07	85.54	5.69	2.42
	9/01/2017	24.21	1.07	75.17	5.52	2.93
	10/01/2017	24.49	0.99	72.83	5.31	2.82
	11/01/2017	24.88	1.10	71.75	6.29	3.37
	12/01/2017	24.17	0.86	77.25	6.70	3.19
	13/01/2017	22.77	1.09	84.29	6.23	2.63
	14/01/2017	23.28	0.80	83.25	5.02	2.36
	15/01/2017	24.36	0.67	79.38	4.59	2.27
	16/01/2017	25.29	1.04	73.67	6.65	3.42
	17/01/2017	24.43	1.07	77.83	7.05	3.33
	18/01/2017	24.66	1.24	82.75	7.06	3.20
	19/01/2017	24.47	1.07	82.29	6.17	2.87
	20/01/2017	24.68	1.12	82.04	4.90	2.47
	21/01/2017	24.90	1.07	81.25	4.89	2.55
	22/01/2017	26.15	1.12	73.83	8.75	4.18
	23/01/2017	24.63	1.30	83.21	4.01	2.05
	24/01/2017	24.01	1.02	86.17	2.96	1.49
	25/01/2017	25.34	1.20	81.88	7.49	3.47
	26/01/2017	26.18	1.35	77.96	9.26	4.39
	27/01/2017	26.30	1.36	78.38	7.65	3.68
	28/01/2017	26.56	1.37	74.21	9.29	4.43
	29/01/2017	26.12	1.33	76.50	7.77	3.84
	30/01/2017	26.57	1.08	75.46	7.66	3.80
	31/01/2017	25.72	1.13	76.50	8.17	3.72

FEBRERO -2017	1/02/2017	26.05	1.21	77.50	8.54	3.96
	2/02/2017	25.90	1.35	77.70	9.36	4.43
	3/02/2017	25.43	1.28	81.00	7.42	3.45
	4/02/2017	25.77	1.37	78.40	7.33	3.69
	5/02/2017	25.15	1.41	79.90	7.52	3.60
	6/02/2017	24.44	1.18	80.10	8.58	3.72
	7/02/2017	23.99	1.14	82.35	7.82	3.36
	8/02/2017	24.53	1.33	79.40	8.22	3.74
	9/02/2017	24.84	1.11	77.45	7.64	3.55
	10/02/2017	24.60	1.11	77.35	6.89	3.31
	11/02/2017	25.79	1.12	71.90	6.70	3.76
	12/02/2017	25.42	1.07	73.30	8.57	4.00
	13/02/2017	25.35	0.81	73.50	5.76	3.01
	14/02/2017	26.06	0.95	70.95	7.20	3.74
	15/02/2017	26.30	1.12	67.90	9.42	4.71
	16/02/2017	25.90	1.00	71.40	6.68	3.45
	17/02/2017	25.30	0.94	77.15	5.41	2.81
	18/02/2017	25.05	1.39	76.45	9.03	4.37
	19/02/2017	25.65	1.12	69.70	8.73	4.39
	20/02/2017	25.81	0.92	71.40	8.96	4.33
	21/02/2017	25.51	0.83	71.15	4.99	2.71
	22/02/2017	25.81	0.99	71.35	8.55	4.21
	23/02/2017	25.49	1.02	76.75	7.89	3.69
	24/02/2017	25.29	1.14	75.35	9.48	4.41
	25/02/2017	25.48	1.08	73.65	8.59	4.07
	26/02/2017	26.62	0.97	67.60	8.23	4.19
	27/02/2017	26.78	1.14	72.35	7.91	4.08
	28/02/2017	26.48	1.54	72.45	9.44	4.59
MARZO -2017	1/03/2017	25.62	1.37	80.75	8.51	3.87
	2/03/2017	26.02	1.43	79.20	9.49	4.39
	3/03/2017	26.58	1.13	76.95	8.50	4.05
	4/03/2017	26.05	1.19	77.15	9.17	4.20
	5/03/2017	25.78	1.21	75.05	10.12	4.67
	6/03/2017	25.43	1.09	75.40	7.96	3.88
	7/03/2017	25.63	1.30	73.15	9.31	4.63
	8/03/2017	25.07	1.13	75.60	4.39	2.61
	9/03/2017	25.78	1.39	69.55	8.69	4.32
	10/03/2017	25.71	1.18	73.80	6.01	3.27
	11/03/2017	25.53	0.95	76.80	7.97	3.67
	12/03/2017	26.12	1.19	74.70	9.08	4.38
	13/03/2017	26.47	1.23	73.70	9.67	4.56
	14/03/2017	25.24	0.87	79.10	3.74	2.05
	15/03/2017	25.53	0.76	81.75	7.72	3.42
	16/03/2017	26.69	1.29	75.20	9.44	4.44
	17/03/2017	25.86	1.15	76.80	8.74	4.05
	18/03/2017	26.14	1.22	74.70	9.23	4.37
	19/03/2017	25.33	1.25	78.45	7.62	3.52
	20/03/2017	24.92	1.23	80.10	7.71	3.54
	21/03/2017	25.28	1.21	77.15	8.76	4.04
	22/03/2017	25.33	1.06	76.10	8.03	3.77
	23/03/2017	25.56	1.20	74.25	7.83	3.89
	24/03/2017	25.42	1.37	71.30	8.56	4.14
	25/03/2017	25.30	1.27	73.55	8.07	4.03
	26/03/2017	24.76	1.02	77.40	6.86	3.36
	27/03/2017	25.34	1.09	73.55	6.78	3.41
	28/03/2017	25.41	1.20	74.90	7.71	3.79
29/03/2017	23.87	1.41	78.55	8.95	4.02	
30/03/2017	23.37	1.15	81.50	7.91	3.35	
31/03/2017	24.03	1.15	79.65	7.19	3.29	

ABRIL -2017	1/04/2017	24.17	1.54	78.75	6.68	3.34
	2/04/2017	22.98	1.05	80.95	6.79	3.01
	3/04/2017	22.98	1.16	80.85	7.59	3.36
	4/04/2017	23.18	1.07	79.40	7.81	3.45
	5/04/2017	23.11	1.18	80.45	7.85	3.45
	6/04/2017	23.15	0.84	80.10	4.96	2.35
	7/04/2017	24.48	1.27	73.00	7.82	3.94
	8/04/2017	23.81	1.10	77.60	6.83	3.27
	9/04/2017	23.92	0.95	77.85	7.99	3.53
	10/04/2017	24.55	1.12	74.05	7.45	3.61
	11/04/2017	22.93	1.04	81.65	7.19	3.12
	12/04/2017	23.39	1.19	79.15	7.55	3.41
	13/04/2017	23.00	1.13	80.65	7.41	3.31
	14/04/2017	22.88	1.18	80.80	7.47	3.33
	15/04/2017	22.71	1.08	80.35	7.48	3.14
	16/04/2017	21.83	1.19	83.65	7.01	2.92
	17/04/2017	21.91	1.11	82.05	6.97	3.00
	18/04/2017	23.29	0.97	76.90	6.99	3.29
	19/04/2017	23.62	1.02	78.05	6.10	2.98
	20/04/2017	23.56	1.16	79.20	6.90	3.25
	21/04/2017	22.80	0.97	83.35	5.32	2.31
	22/04/2017	22.73	1.12	82.85	6.67	2.86
	23/04/2017	21.07	1.23	88.90	5.00	1.91
	24/04/2017	20.33	1.10	90.35	2.22	0.97
	25/04/2017	22.13	1.27	79.65	4.14	2.18
	26/04/2017	21.91	1.02	83.95	6.12	2.66
	27/04/2017	22.26	0.93	82.05	6.17	2.73
	28/04/2017	21.10	1.13	86.65	5.73	2.44
	29/04/2017	19.10	1.14	93.85	1.31	0.58
	30/04/2017	19.14	0.88	93.35	1.70	0.64
MAYO-2017	1/05/2017	20.22	1.10	88.95	5.14	1.96
	2/05/2017	19.53	1.24	91.30	3.39	1.24
	3/05/2017	20.37	1.13	88.20	4.72	1.92
	4/05/2017	20.16	1.25	85.70	5.66	2.35
	5/05/2017	20.50	1.34	83.30	5.73	2.49
	6/05/2017	21.01	1.21	83.20	4.95	2.27
	7/05/2017	22.56	1.32	76.75	5.18	2.76
	8/05/2017	19.93	0.98	89.65	4.34	1.65
	9/05/2017	21.66	0.95	82.00	5.13	2.31
	10/05/2017	24.23	1.33	71.30	5.59	3.15
	11/05/2017	23.70	1.33	69.65	5.42	3.11
	12/05/2017	22.45	1.35	73.00	5.39	2.83
	13/05/2017	20.88	1.33	85.55	5.48	2.39
	14/05/2017	20.77	1.52	86.45	4.51	2.08
	15/05/2017	20.88	1.14	86.60	4.05	1.77
	16/05/2017	20.13	1.26	89.15	4.07	1.56
	17/05/2017	19.47	1.09	90.20	3.34	1.38
	18/05/2017	19.65	1.40	86.70	4.54	1.91
	19/05/2017	19.48	1.30	87.80	3.65	1.58
	20/05/2017	18.94	1.29	88.35	3.46	1.54
	21/05/2017	18.33	0.86	89.90	1.48	0.64
	22/05/2017	18.57	0.85	90.10	3.00	1.19
	23/05/2017	18.94	1.22	89.90	4.49	1.74
	24/05/2017	18.42	1.28	94.30	1.19	0.54
	25/05/2017	19.50	1.14	88.15	1.85	1.03
	26/05/2017	19.44	0.88	87.25	1.51	0.75
	27/05/2017	19.45	0.86	88.30	3.14	1.31
	28/05/2017	18.55	0.92	91.95	1.67	0.64
	29/05/2017	18.53	1.03	94.05	1.76	0.63
	30/05/2017	17.69	0.87	96.30	1.14	0.37
	31/05/2017	17.31	0.82	96.60	0.95	0.33

JUNIO-2017	1/06/2017	17.47	0.49	95.55	0.99	0.37
	2/06/2017	18.70	0.76	89.20	1.91	0.98
	3/06/2017	18.08	1.16	88.25	2.22	1.11
	4/06/2017	17.89	1.06	88.45	2.72	1.10
	5/06/2017	17.41	0.79	91.75	1.24	0.50
	6/06/2017	17.16	0.89	93.60	0.95	0.38
	7/06/2017	18.21	1.19	87.90	2.47	1.10
	8/06/2017	17.67	0.79	92.45	1.09	0.46
	9/06/2017	17.60	0.80	93.15	1.35	0.50
	10/06/2017	16.98	0.98	92.80	1.44	0.55
	11/06/2017	16.55	1.06	92.15	1.77	0.66
	12/06/2017	17.26	0.78	88.95	3.11	1.21
	13/06/2017	17.73	0.81	87.65	3.55	1.38
	14/06/2017	17.64	1.21	88.95	3.71	1.38
	15/06/2017	17.83	1.29	89.15	4.51	1.65
	16/06/2017	17.21	1.46	88.65	3.70	1.48
	17/06/2017	16.58	1.10	89.35	1.46	0.77
	18/06/2017	17.34	0.92	86.40	2.00	1.08
	19/06/2017	17.55	0.81	86.50	3.26	1.34
	20/06/2017	17.52	1.39	89.35	3.58	1.39
	21/06/2017	18.00	1.37	87.75	3.91	1.64
	22/06/2017	17.55	1.37	88.85	3.61	1.52
	23/06/2017	17.84	1.14	85.40	3.60	1.60
	24/06/2017	17.86	0.82	85.40	3.40	1.40
	25/06/2017	17.62	1.03	86.10	4.14	1.63
	26/06/2017	16.82	1.07	90.30	1.82	0.88
	27/06/2017	17.20	1.10	89.35	1.46	0.60
	28/06/2017	17.64	1.02	88.30	2.74	1.17
	29/06/2017	17.16	1.24	90.25	1.94	0.75
	30/06/2017	16.99	1.14	90.40	2.42	0.90
JULIO-2017	1/07/2017	16.89	1.17	88.35	2.30	0.99
	2/07/2017	17.28	1.21	88.65	3.57	1.51
	3/07/2017	17.35	1.00	86.20	2.76	1.25
	4/07/2017	17.59	1.32	83.80	3.59	1.65
	5/07/2017	17.08	1.29	88.85	2.58	1.02
	6/07/2017	17.29	1.31	86.25	3.80	1.49
	7/07/2017	16.95	1.12	88.60	2.66	1.01
	8/07/2017	16.63	1.24	88.20	1.76	0.93
	9/07/2017	16.86	0.95	86.65	2.59	1.21
	10/07/2017	16.63	0.94	90.55	1.52	0.55
	11/07/2017	16.37	0.66	92.85	1.17	0.44
	12/07/2017	16.82	0.95	86.35	2.93	1.30
	13/07/2017	16.79	1.29	86.35	3.23	1.41
	14/07/2017	17.20	1.33	85.20	3.45	1.66
	15/07/2017	17.02	1.21	87.40	3.66	1.56
	16/07/2017	16.80	1.32	86.30	3.02	1.40
	17/07/2017	16.99	1.48	85.90	4.24	1.73
	18/07/2017	16.73	1.47	87.75	3.95	1.55
	19/07/2017	15.42	1.39	92.40	1.47	0.57
	20/07/2017	15.60	0.95	90.80	2.75	1.04
	21/07/2017	16.23	1.31	86.80	3.86	1.52
	22/07/2017	16.50	1.17	86.45	4.54	1.80
	23/07/2017	17.25	1.05	85.60	4.23	1.69
	24/07/2017	15.77	0.91	92.40	1.08	0.48
	25/07/2017	16.42	1.04	88.15	3.20	1.27
	26/07/2017	16.20	1.20	89.20	2.00	0.99
	27/07/2017	16.35	1.29	88.90	2.92	1.22
	28/07/2017	16.51	1.33	86.90	2.97	1.22
	29/07/2017	16.10	0.87	88.85	1.38	0.62
	30/07/2017	16.93	1.11	83.00	4.40	1.87
	31/07/2017	16.81	0.83	87.25	3.84	1.48

Anexo 2: Método de análisis jerárquico (MAJ)

Coefficientes de riesgo seleccionado verano y otoño

Total Decision - CESPED VERANO.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

<< Cambiar Método >>

Objetivo - Coeficiente más adecuado

Pares

Con respecto a Objetivo - Coeficiente más adecuado: ¿Cuál de los siguientes criterios es más importante?

Calidad Moderado Mantenimiento

Ratio de Inconsistencia: 1,58 %

	laminas de agua	Calidad	Mantenimiento
laminas de agua	1	2	4
Calidad	1/2	1	3
Mantenimiento	1/4	1/3	1

Total Decision - CESPED VERANO.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

<< Cambiar Método >>

laminas de agua

Pares

Con respecto a laminas de agua: ¿Cuál de las siguientes alternativas es más importante?

Ratio de Inconsistencia: 7,67 %

	Coeficiente 1	Coeficiente 2	Coeficiente 3	Coeficiente 4
Coeficiente 1	1	1/2	1/3	1/4
Coeficiente 2	2	1	2	2
Coeficiente 3	3	1/2	1	1
Coeficiente 4	4	1/2	1	1

Total Decision - CESPED VERANO.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

<< Cambiar Método

Calidad

Pares

Con respecto a Calidad: ¿Cuál de las siguientes alternativas es más importante?

Opciones

Ratio de Inconsistencia: 5,73 %

	Coeficiente 1	Coeficiente 2	Coeficiente 3	Coeficiente 4
Coeficiente 1	1	1	6	6
Coeficiente 2	1	1	6	6
Coeficiente 3	1/6	1/6	1	3
Coeficiente 4	1/6	1/6	1/3	1

Total Decision - CESPED VERANO.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

Modo Distributivo Modo Ideal

Alternativa	Objetivo (%)
Coeficiente 2	36,60 %
Coeficiente 4	23,17 %
Coeficiente 1	20,31 %
Coeficiente 3	19,92 %

Criterio	CR (%)
Objetivo - Coeficiente mas ad...	1,58 %
laminas de agua	7,67 %
Calidad	5,73 %
Mantenimiento	6,69 %

Detalle del peso de las Alternativas por Criterios

	laminas de agua	Calidad	Mantenimiento
Coeficiente 1	10,62 %	42,38 %	6,86 %
Coeficiente 2	38,36 %	42,38 %	13,44 %
Coeficiente 3	24,25 %	9,73 %	26,79 %
Coeficiente 4	26,78 %	5,52 %	52,91 %

Detalle de los pesos locales y globales de los criterios

	laminas de	Calidad	Mantenimiento
Peso Local	55,84 %	31,96 %	12,20 %
Peso Global	55,84 %	31,96 %	12,20 %

Total Decision - CESPED VERANO.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

Modo Distributivo Modo Ideal

Alternativa	Objetivo (%)
Coficiente 2	36,60 %
Coficiente 4	23,17 %
Coficiente 1	20,31 %
Coficiente 3	19,92 %

Criterio	CR (%)
Objetivo - Coficiente mas ad...	1,58 %
laminas de agua	7,67 %
Calidad	5,73 %
Mantenimiento	6,69 %

Detalle del peso de las Alternativas por Criterios

	laminas de agua	Calidad	Mantenimiento
Coficiente 1	10,62 %	42,38 %	6,86 %
Coficiente 2	38,36 %	42,38 %	13,44 %
Coficiente 3	24,25 %	9,73 %	26,79 %
Coficiente 4	26,78 %	5,52 %	52,91 %

Detalle de los pesos locales y globales de los criterios

	laminas de	Calidad	Mantenimiento
Peso Local	55,84 %	31,96 %	12,20 %
Peso Global	55,84 %	31,96 %	12,20 %

Coficientes de riesgo seleccionado invierno

Total Decision - CESPED VERANO.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

<< Cambiar Método

Objetivo - Coficiente mas adecuado

Pares

Con respecto a Objetivo - Coficiente mas adecuado: ¿Cuál de los siguientes criterios es más importante?

Calidad Mantenimiento

Moderado

Ratio de Inconsistencia: 1,58 %

	laminas de agua	Calidad	Mantenimiento
laminas de agua	1	2	4
Calidad	1/2	1	3
Mantenimiento	1/4	1/3	1

Total Decision - CESPED VERANO.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

<< Cambiar Método

laminas de agua

Pares

Con respecto a laminas de agua: ¿Cuál de las siguientes alternativas es más importante?

Opciones

Ratio de Inconsistencia: 4,33 %

	Coeficiente 1	Coeficiente 2	Coeficiente 3	Coeficiente 4
Coeficiente 1	1	1/3	1/5	1/7
Coeficiente 2	3	1	1/3	1/5
Coeficiente 3	5	3	1	1/3
Coeficiente 4	7	5	3	1

Total Decision - CESPED VERANO.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

<< Cambiar Método

Calidad

Pares

Con respecto a Calidad: ¿Cuál de las siguientes alternativas es más importante?

Opciones

Ratio de Inconsistencia: 8,45 %

	Coeficiente 1	Coeficiente 2	Coeficiente 3	Coeficiente 4
Coeficiente 1	1	1/3	1/5	1/7
Coeficiente 2	3	1	1/5	1/7
Coeficiente 3	5	5	1	1/3
Coeficiente 4	7	7	3	1

Total Decision - CESPED VERANO.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

<< Cambiar Método

Mantenimiento

Pares

Con respecto a Mantenimiento: ¿Cuál de las siguientes alternativas es más importante?

Opciones

Ratio de Inconsistencia: 4,33 %

	Coficiente 1	Coficiente 2	Coficiente 3	Coficiente 4
Coficiente 1	1	1/3	1/5	1/7
Coficiente 2	3	1	1/3	1/5
Coficiente 3	5	3	1	1/3
Coficiente 4	7	5	3	1

Total Decision - CESPED VERANO.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

Modo Distributivo Modo Ideal

Alternativa	Objetivo (%)
Coficiente 4	56,78 %
Coficiente 3	26,84 %
Coficiente 2	10,93 %
Coficiente 1	5,44 %

Criterio	CR (%)
Objetivo - Coficiente mas ad...	1,58 %
laminas de agua	4,33 %
Calidad	8,45 %
Mantenimiento	4,33 %

Detalle del peso de las Alternativas por Criterios

	laminas de agua	Calidad	Mantenimiento
Coficiente 1	5,53 %	5,25 %	5,53 %
Coficiente 2	11,76 %	9,18 %	11,76 %
Coficiente 3	26,21 %	28,17 %	26,21 %
Coficiente 4	56,49 %	57,40 %	56,49 %

Detalle de los pesos locales y globales de los criterios

	laminas de	Calidad	Mantenimiento
Peso Local	55,84 %	31,96 %	12,20 %
Peso Global	55,84 %	31,96 %	12,20 %

Coeficientes de riesgo seleccionado para primavera

Total Decision - PRIMAVERA.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

<< Cambiar Método

laminas de agua

Pares

Con respecto a laminas de agua: ¿Cuál de las siguientes alternativas es más importante?

Opciones

Ratio de Inconsistencia: 6,93 %

	Coeficiente 1	Coeficiente 2	Coeficiente 3	Coeficiente 4
Coeficiente 1	1	1/2	1/4	1/4
Coeficiente 2	2	1	1/3	1/5
Coeficiente 3	4	3	1	2
Coeficiente 4	4	5	1/2	1

Total Decision - CESPED VERANO.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

<< Cambiar Método

Objetivo - Coeficiente mas adecuado

Pares

Con respecto a Objetivo - Coeficiente mas adecuado: ¿Cuál de los siguientes criterios es más importante?

Calidad

Mantenimiento

Opciones

Ratio de Inconsistencia: 1,58 %

	laminas de agua	Calidad	Mantenimiento
laminas de agua	1	2	4
Calidad	1/2	1	3
Mantenimiento	1/4	1/3	1

Total Decision - PRIMAVERA.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

<< Cambiar Método

Calidad

Pares

Con respecto a Calidad: ¿Cuál de las siguientes alternativas es más importante?

Opciones

Ratio de Inconsistencia: 6,82 %

	Coficiente 1	Coficiente 2	Coficiente 3	Coficiente 4
Coficiente 1	1	1	1/3	1/5
Coficiente 2	1	1	1/5	1/7
Coficiente 3	3	5	1	2
Coficiente 4	5	7	1/2	1

Total Decision - PRIMAVERA.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

<< Cambiar Método

Mantenimiento

Pares

Con respecto a Mantenimiento: ¿Cuál de las siguientes alternativas es más importante?

Opciones

Ratio de Inconsistencia: 8,95 %

	Coficiente 1	Coficiente 2	Coficiente 3	Coficiente 4
Coficiente 1	1	1/3	1/5	1/4
Coficiente 2	3	1	1/3	1/5
Coficiente 3	5	3	1	2
Coficiente 4	4	5	1/2	1

Total Decision - PRIMAVERA.dahp

ARCHIVO OPCIONES AYUDA

NUEVO ABRIR GUARDAR GUARDAR COMO...

VISTA MODELO PONDERACIÓN & VALORES RESULTADO GRÁFICOS MONTE CARLO

Modo Distributivo
 Modo Ideal

Alternativa	Objetivo (%)
Coficiente 3	44,29 %
Coficiente 4	36,60 %
Coficiente 2	10,69 %
Coficiente 1	8,41 %

Criterio	CR (%)
Objetivo - Coficiente mas ad...	1,58 %
laminas de agua	6,93 %
Calidad	6,82 %
Mantenimiento	8,95 %

Detalle del peso de las Alternativas por Criterios

	laminas de agua	Calidad	Mantenimiento
Coficiente 1	8,15 %	9,46 %	6,85 %
Coficiente 2	11,99 %	7,51 %	13,13 %
Coficiente 3	44,00 %	44,69 %	44,59 %
Coficiente 4	35,87 %	38,34 %	35,43 %

Detalle de los pesos locales y globales de los criterios

	laminas de	Calidad	Mantenimiento
▶ Peso Local	55,84 %	31,96 %	12,20 %
Peso Global	55,84 %	31,96 %	12,20 %

Anexo 3: Zonas de evapotranspiración potencial de California (USA)

California Irrigation Management Information System (CIMIS) REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ZONES



Fuente: Costello *et al.* (2000)

Reference Evapotranspiration Rates for Selected Cities*

Daily Average Reference Evapotranspiration by ET_o Zone (inches per day)

ET _o Zone	City	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
1	Santa Monica	0.03	0.05	0.08	0.11	0.13	0.15	0.15	0.13	0.11	0.08	0.04	0.02
2	Santa Cruz	0.04	0.06	0.10	0.13	0.15	0.17	0.16	0.15	0.13	0.09	0.06	0.04
3	Monterey/Salinas	0.06	0.08	0.12	0.16	0.17	0.19	0.18	0.17	0.14	0.11	0.08	0.06
4	San Diego	0.06	0.08	0.11	0.15	0.17	0.19	0.19	0.18	0.15	0.11	0.08	0.06
5	Santa Rosa	0.03	0.06	0.09	0.14	0.18	0.21	0.21	0.19	0.15	0.10	0.05	0.03
6	Los Angeles	0.06	0.08	0.11	0.16	0.18	0.21	0.21	0.20	0.16	0.12	0.08	0.06
7	Alturas	0.02	0.05	0.08	0.13	0.17	0.21	0.24	0.21	0.16	0.09	0.04	0.02
8	San Jose	0.04	0.06	0.11	0.16	0.20	0.23	0.24	0.21	0.17	0.11	0.06	0.03
9	San Bernardino Pasadena	0.07	0.10	0.13	0.17	0.19	0.22	0.24	0.22	0.19	0.13	0.09	0.06
10	Paicines	0.03	0.06	0.10	0.15	0.19	0.24	0.26	0.23	0.17	0.10	0.05	0.03
11	Sonora	0.05	0.08	0.10	0.15	0.19	0.24	0.26	0.24	0.19	0.12	0.07	0.05
12	Fresno	0.04	0.07	0.11	0.17	0.22	0.26	0.26	0.23	0.18	0.12	0.06	0.03
13	Quincy	0.04	0.07	0.10	0.16	0.21	0.26	0.29	0.25	0.19	0.12	0.06	0.03
14	Sacramento	0.05	0.08	0.12	0.17	0.22	0.26	0.28	0.25	0.19	0.13	0.07	0.05
15	Bakersfield	0.04	0.08	0.12	0.19	0.24	0.27	0.28	0.25	0.19	0.13	0.07	0.04
16	Hanford	0.05	0.09	0.13	0.19	0.25	0.29	0.30	0.27	0.21	0.14	0.08	0.05
17	Needles	0.06	0.10	0.15	0.20	0.26	0.30	0.32	0.28	0.22	0.14	0.09	0.06
18	Palm Springs	0.08	0.12	0.17	0.23	0.28	0.32	0.31	0.28	0.23	0.16	0.10	0.07

* For comprehensive descriptions of each zone and to locate your region in a zone, see the California Irrigation Management Information System (CIMIS) color map opposite this page.

As a result, species which are listed as appropriate for the low desert and inappropriate for the high desert may be marginally hardy and appropriate to try in the intermediate desert.

Some Cities that Characterize Each Region					
REGION 1 North-Central Coastal	REGION 2 Central Valley	REGION 3 South Coastal	REGION 4 South Inland Valley	REGION 5 Intermediate & High Desert	REGION 6 Low Desert
Concord	Auburn	Anaheim	Altadena	Apple Valley	Borrego Springs
Cupertino	Bakersfield	Camarillo	Azusa	Barstow	Blythe
Healdsburg	Chico	Fallbrook	Chino	Bishop	Brawley
Livermore	Coalinga	Fullerton	Corona	Boulder City	Coachella
Los Altos Hills	Fresno	Irvine	Covina	China Lake	Desert Center
Napa	Los Banos	Laguna Beach	El Monte	Gorman	Desert Hot Springs
Novato	Marysville	La Mesa	Escondido	Independence	Death Valley
Oakland	Merced	Long Beach	Hemet	Joshua Tree	El Centro
Petaluma	Modesto	Los Angeles	Ojai	Lancaster	Indian Wells
Salinas	Red Bluff	Mission Viejo	Pasadena	Lone Pine	Indio
San Francisco	Redding	Oxnard	Perris	Mojave	Jacumba
San Jose	Roseville	Santa Ana	Pomona	Olancho	Needles
San Luis Obispo	Sacramento	Santa Barbara	Ramona	Palmdale	Palm Desert
Santa Cruz	Stockton	San Diego	Riverside	Pear Blossom	Palm Springs
Santa Rosa	Tracy	San Juan Capistrano	San Bernardino	Tehachapi	Rancho Mirage
	Visalia	Santa Monica	San Fernando	Victorville	Thermal
		Ventura	Santa Paula		
		Vista	Sun City		
		Whittier	Thousand Oaks		
			Van Nuys		

Fuente: Costello *et al.* (2000)

Regions

Since there are substantially different climate zones¹ in California, species are evaluated for six regions which represent different climatic conditions.

Region 1

North-Central Coastal (California Climate Zones 14, 15, 16, and 17) (CIMIS ET_o Zones 1, 2, 3, 4, 6 and 8)²

Region 2

Central Valley (California Climate Zones 8, 9 and 14), (CIMIS ET_o Zones 12, 14, 15, and 16)

Region 3

South Coastal (California Climate Zones 22, 23 and 24), (CIMIS ET_o Zones 1, 2, 4 and 6)

Region 4

South Inland Valleys and Foothills (California Climate Zones 18, 19, 20 and 21), (CIMIS ET_o Zone 9)

Region 5

High and Intermediate Desert (California Climate Zone 11), (CIMIS ET_o Zones 14 and 17)

Region 6

Low Desert (California Climate Zone 13), (CIMIS ET_o Zone 18)

¹ California climate zones are described in University of California Publication 3328, *Generalized Plant Climate Zones of California and Sunset Western Garden Book*.

² ET_o Zones are described in the *California Irrigation Management Information System (CIMIS) Reference Evapotranspiration Map*, 1999 (see map on page 141).

Notes on Regions

Within each region there is some variability in climate patterns among the cities listed. For example, some cities may be considerably warmer than others during the summer months, yet they are within the same region. This variability can only be reduced by increasing the number of regions, which would cause the list to become enlarged and somewhat more complicated.

For certain locations (considered atypical for the region), it may be useful to consider evaluations from another region that more closely characterizes the location of interest. For example, if a city in Region 1 has a climate more closely characterized by Region 2, then Region 2 species evaluations should be considered for that location. Such assessments will need to be based on the judgement of the user.

If a city is not listed and is located in California Climate Zone 14 which overlaps regions 1 and 2, it will be necessary to decide if the city is more similar in climate to Petaluma (coastal influence) or Sacramento Valley.

If a city is located in a California Climate Zone which was not evaluated (zones 1, 2, 3, and 7—mainly high elevation, cold winter areas) an estimate may be made by looking at all the evaluations for the species in question. Hardiness is typically the major factor in determining if a species is appropriate or not.

The main difference between the California high and intermediate desert regions is that the high desert is colder in the winter; as the elevation increases so does the frequency of temperatures below freezing.

Fuente: Costello *et al.* (2000)

Anexo 4: Selección de emisor y especificaciones técnicas de los emisores.

Selección de aspersores en función de su radio de humedad y velocidad de aplicación



Emisor	Modelo	Radio (m)	Caudal (m ³ /hr)	Rango de Presion (m)		Vel. Aplicación (mm/hr)	
				Presion Actual (m)	Presion Actual (m)	Cuadrado	Triangulo
Difusor	Serie VAN	1.2 - 5.5	0.07 - 1.20	10.0 - 21	15 - 20	40.0 - 240.0	46.0 - 280.0
Tob. giratoria	RVAN	4.0 - 7.2	1.48 - 13	21 - 38	30 - 35	15.0 - 16.0	16.0 - 19.0
Rotor	3500	4.0 - 10.0	0.12 - 1.04	17 - 38	30 - 35	12.0 - 18.0	14.0 - 21.0
Rotor	5000	7.0 - 15.0	0.70 - 2.19	17 - 45	30 - 35	5.0 - 19.0	6.0 - 22.0
Rotor	6504	11.9 - 19.8	0.66 - 4.98	21 - 62	40 - 45	9.0 - 25.0	11.0 - 29.0

Fuente: Rain Bird (2017)



Tubería con goteros XFS de color marrón con tecnología Copper Shield™

Solución fiable y duradera para instalaciones de riego por goteo enterrado en césped, arbustos y tapizantes

Premio 2013 de la Asociación Europea de Riego
Medalla de plata
(Categorías zonas verdes)



Alta fiabilidad de la tubería color marrón con goteros XFS para instalar enterrada



XFS
ENTERRADO

- **Tecnología Copper Shield™ de Rain Bird con patente solicitada** – Protege el gotero de la entrada de raíces sin necesidad de utilizar productos químicos agresivos
- **Color cobre** – Para una fácil identificación y garantía de que el cobre está en el interior, protegiendo el gotero contra la entrada de raíces
- **Tolerancia a la obturación** – Resiste las obstrucciones gracias a los pasos de agua de gran sección, junto con una acción autolimpiante de la membrana flotante.
- **Flexible** – La mezcla de materiales exclusiva de Rain Bird proporciona una flexibilidad líder en el sector y permite giros más cerrados con menos codos, para una instalación más rápida y fácil

Fuente: Rain Bird (2017)

Riego enterrado

- 90% de eficiencia de riego
- 30% - 70% de ahorro de agua frente al riego con aspersores
- El gotero autocompensante proporciona un caudal constante en toda la longitud lateral, asegurando la mayor uniformidad con la máxima fiabilidad cuando trabaja con presiones entre 0,59 y 4,1 bar.

Para obtener más información sobre XFS, visite: www.rainbird.eu

Modelos de tuberías con goteros XFS

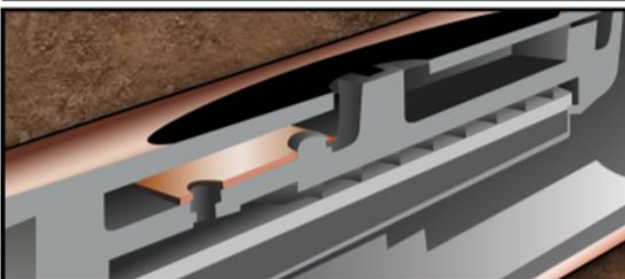
- XFS-23-33-100
- XFS-23-50-100
- XFSV-23-33-100

Cómo especificar

XFS - 23 - 33 - 100



Para obtener más información sobre XFS, visite: www.rainbird.eu



Los goteros XFS se protegen de la entrada de raíces con la tecnología Copper Shield de Rain Bird, con patente solicitada, logrando un sistema que no requiere mantenimiento o cambio de productos químicos para evitar la entrada de raíces. El color marrón exterior garantiza que el cobre está en su interior.

El gotero autocompensante proporciona un caudal constante en toda la longitud lateral, asegurando la mayor uniformidad con la máxima fiabilidad cuando trabaja con presiones entre 0,59 y 4,1 bar.



Política de satisfacción del cliente profesional de Rain Bird

Los goteros de la serie XF ofrecen (5) años de garantía en la mano de obra del producto y siete (7) años contra agrietamiento por estrés medioambiental

Rain Bird Europe SNC
900, rue Ampère, B.P. 72000
13792 Aix-en-Provence Cedex 3 - France
Tel: (33) 4 42 24 44 61
Fax: (33) 4 42 24 24 72

Rain Bird France SNC
900, rue Ampère, B.P. 72000
13792 Aix-en-Provence Cedex 3 - France
Tel: (33) 4 42 24 44 61
Fax: (33) 4 42 24 24 72

Rain Bird Sverige AB
Fleringevägen 315
254 77 Fleringe - Sverige
Tel: (46) 42 25 04 80
Fax: (46) 42 20 40 65

Anexo 5: Demandas y balance hídrico de los escenarios

a) Escenarios requerimiento cesped, riego por inundacion (ks 1 y eficiencia de riego 40%)

	ks	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
	1.00												
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Área jardines (ha)	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20
ETo (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.8	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Coefficiente de jardín (KJ)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ETJ (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.80	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Lamina neta (mm/mes)	119.97	119.28	130.51	104.40	77.81	54.00	52.39	60.45	71.10	91.45	94.80	105.71	1082
Ef. De riego	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.40
Lamina Bruta (mm/día)	9.68	10.65	10.53	8.70	6.28	4.50	4.23	4.88	5.93	7.38	7.90	8.53	7.43
Lamina Bruta (mm/mes)	299.93	298.20	326.28	261.00	194.53	135.00	130.98	151.13	177.75	228.63	237.00	264.28	2705
Demanda de agua (m ³ /mes)	45,589	45,326	49,594	39,672	29,568	20,520	19,908	22,971	27,018	34,751	36,024	40,170	411111
Demanda de agua por semana (m ³ /semana)	10,294	11,332	11,199	9,257	6,677	4,788	4,495	5,187	6,304	7,847	8,406	9,071	7905
Oferta de agua (m ³ /mes)	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	233280
Oferta de agua por semana (m ³ /semana)	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860
Balance de agua (m ³ /mes)	-26,149	-25,886	-30,154	-20,232	-10,128	-1,080	-468	-3,531	-7,578	-15,311	-16,584	-20,730	-177831
Balance de agua por semana (m ³ /semana)	-5,434	-6,472	-6,339	-4,397	-1,817	72	365	-327	-1,444	-2,987	-3,546	-4,211	-36536

b) Escenarios requerimiento cesped, riego por aspersión 1 (ks 1 y eficiencia de riego 40%)

	ks	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
	1.00												
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Área jardines (ha)	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20
ETo (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.8	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Coefficiente de jardín (KJ)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ETJ (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.80	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Lamina neta (mm/mes)	119.97	119.28	130.51	104.40	77.81	54.00	52.39	60.45	71.10	91.45	94.80	105.71	1082
Ef. De riego	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.70
Lamina Bruta (mm/día)	5.53	6.09	6.01	4.97	3.59	2.57	2.41	2.79	3.39	4.21	4.51	4.87	4.25
Lamina Bruta (mm/mes)	171.39	170.40	186.44	149.14	111.16	77.14	74.84	86.36	101.57	130.64	135.43	151.01	1546
Demanda de agua (m ³ /mes)	26,051	25,901	28,339	22,670	16,896	11,726	11,376	13,126	15,439	19,858	20,585	22,954	234920
Demanda de agua por semana (m ³ /semana)	5,882	6,475	6,399	5,290	3,815	2,736	2,569	2,964	3,602	4,484	4,803	5,183	4517
Oferta de agua (m ³ /mes)	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	233280
Oferta de agua por semana (m ³ /semana)	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860
Balance de agua (m ³ /mes)	-6,611	-6,461	-8,899	-3,230	2,544	7,714	8,064	6,314	4,001	-418	-1,145	-3,514	-1640
Balance de agua por semana (m ³ /semana)	-1,022	-1,615	-1,539	-430	1,045	2,124	2,291	1,896	1,258	376	57	-323	4117

c) Escenarios requerimiento cesped, riego por rotores y difusores (ks 0.8 y eficiencia de riego 75%) y cubre suelos (ks 0.4 y eficiencia de riego 60 %)													
	ks	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
	0.80												
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Área jardines (ha)	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12
ETo (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.8	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Coefficiente de jardín (KJ)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ETJ (mm/día)	3.10	3.41	3.37	2.78	2.01	1.44	1.35	1.56	1.90	2.36	2.53	2.73	2.38
Lamina neta (mm/mes)	95.98	95.42	104.41	83.52	62.25	43.20	41.91	48.36	56.88	73.16	75.84	84.57	865.50
Ef. De riego	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Lamina Bruta (mm/día)	4.13	4.54	4.49	3.71	2.68	1.92	1.80	2.08	2.53	3.15	3.37	3.64	3.17
Lamina Bruta (mm/mes)	127.97	127.23	139.21	111.36	83.00	57.60	55.88	64.48	75.84	97.55	101.12	112.76	1154
Demanda de agua (m ³ /mes)	16,789	16,693	18,264	14,610	10,889	7,557	7,332	8,460	9,950	12,798	13,267	14,794	151404
Demanda de agua por semana (m ³ /semana)	3,791	4,173	4,124	3,409	2,459	1,763	1,656	1,910	2,322	2,890	3,096	3,341	2911
	ks												
	0.4												
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Área jardines (ha)	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
ETo (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.8	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Coefficiente de jardín (KJ)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
ETJ (mm/día)	1.55	1.70	1.68	1.39	1.00	0.72	0.68	0.78	0.95	1.18	1.26	1.36	1.19
Lamina neta (mm/mes)	47.99	47.71	52.20	41.76	31.12	21.60	20.96	24.18	28.44	36.58	37.92	42.28	433
Ef. de riego	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.60
Lamina Bruta (mm/día)	2.58	2.84	2.81	2.32	1.67	1.20	1.13	1.30	1.58	1.97	2.11	2.27	1.98
Lamina Bruta (mm/mes)	79.98	79.52	87.01	69.60	51.87	36.00	34.93	40.30	47.40	60.97	63.20	70.47	721
Demanda de agua (m ³ /mes)	1,664	1,654	1,810	1,448	1,079	749	726	838	986	1,268	1,315	1,466	15002
Demanda de agua por semana (m ³ /semana)	376	414	409	338	244	175	164	189	230	286	307	331	3461
Descripción	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Demanda total de agua (m ³ /mes)	18,453	18,347	20,074	16,058	11,968	8,306	8,058	9,298	10,936	14,066	14,582	16,260	166406
Demanda total de agua por semana (m ³ /semana)	4,167	4,587	4,533	3,747	2,703	1,938	1,820	2,100	2,552	3,176	3,402	3,672	3200
Oferta de agua (m ³ /mes)	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	233280
Oferta de agua por semana (m ³ /semana)	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860
Balance de agua (m ³ /mes)	987	1,093	-634	3,382	7,472	11,134	11,382	10,142	8,504	5,374	4,858	3,180	66874
Balance de agua por semana (m ³ /semana)	693	273	327	1,113	2,157	2,922	3,040	2,760	2,308	1,684	1,458	1,188	19925

d) Escenarios requerimiento cesped, Riego por rotores y difusores (ks por estaciones para cesped 0.8,0.8, 0.4 ,0.6 y eficiencia 75%) y cubre suelos (ks 0.4 y eficiencia 60 %)													
ks	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
0.80													
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Área jardines (ha)	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12
ETo (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.8	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Coefficiente de jardín (KJ)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.65
ETJ (mm/día)	3.10	3.41	3.37	2.78	2.01	1.44	0.68	0.78	0.95	1.77	1.90	2.05	2.02
Lamina neta (mm/mes)	95.98	95.42	104.41	83.52	62.25	43.20	20.96	24.18	28.44	54.87	56.88	63.43	734
Ef. de riego	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Lamina Bruta (mm/día)	4.13	4.54	4.49	3.71	2.68	1.92	0.90	1.04	1.26	2.36	2.53	2.73	2.69
Lamina Bruta (mm/mes)	127.97	127.23	139.21	111.36	83.00	57.60	27.94	32.24	37.92	73.16	75.84	84.57	978
Demanda de agua (m³/mes)	16,789	16,693	18,264	14,610	10,889	7,557	3,666	4,230	4,975	9,599	9,950	11,095	128318
Demanda de agua por semana (m³/semana)	3,791	4,173	4,124	3,409	2,459	1,763	828	955	1,161	2,167	2,322	2,505	2472
ks													
0.4													
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Área jardines (ha)	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
ETo (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.8	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Coefficiente de jardín (KJ)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
ETJ (mm/día)	1.55	1.70	1.68	1.39	1.00	0.72	0.68	0.78	0.95	1.18	1.26	1.36	1.19
Lamina neta (mm/mes)	47.99	47.71	52.20	41.76	31.12	21.60	20.96	24.18	28.44	36.58	37.92	42.28	433
Ef. De riego	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.60
Lamina Bruta (mm/día)	2.58	2.84	2.81	2.32	1.67	1.20	1.13	1.30	1.58	1.97	2.11	2.27	1.98
Lamina Bruta (mm/mes)	79.98	79.52	87.01	69.60	51.87	36.00	34.93	40.30	47.40	60.97	63.20	70.47	721
Demanda de agua (m³/mes)	1,664	1,654	1,810	1,448	1,079	749	726	838	986	1,268	1,315	1,466	15002
Demanda de agua por semana (m³/semana)	376	414	409	338	244	175	164	189	230	286	307	331	3461
Descripción	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Demanda total de agua (m³/mes)	18,453	18,347	20,074	16,058	11,968	8,306	4,392	5,068	5,961	10,867	11,265	12,561	143320
Demanda total de agua por semana (m³/semana)	4,167	4,587	4,533	3,747	2,703	1,938	992	1,144	1,391	2,454	2,628	2,836	2760
Oferta de agua (m³/mes)	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	233280
Oferta de agua por semana (m³/semana)	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860
Balance de agua (m³/mes)	987	1,093	-634	3,382	7,472	11,134	15,048	14,372	13,479	8,573	8,175	6,879	89960
Balance de agua por semana (m³/semana)	693	273	327	1,113	2,157	2,922	3,868	3,716	3,469	2,406	2,232	2,024	25200

e) Escenarios requerimiento cesped, riego por rotores y goteo (ks por estaciones 0.8,0.8, 0.4 ,0.6 y eficiencia 75 %) y cubre suelos (ks 0.4 y eficiencia 90 %)													
ks	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	30
0.80													
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Área jardines (ha)	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12
ETo (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.8	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Coefficiente de jardín (KJ)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.65
ETJ (mm/día)	3.10	3.41	3.37	2.78	2.01	1.44	0.68	0.78	0.95	1.77	1.90	2.05	2.02
Lamina neta (mm/mes)	95.98	95.42	104.41	83.52	62.25	43.20	20.96	24.18	28.44	54.87	56.88	63.43	734
Ef. de riego	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Lamina Bruta (mm/día)	4.13	4.54	4.49	3.71	2.68	1.92	0.90	1.04	1.26	2.36	2.53	2.73	2.69
Lamina Bruta (mm/mes)	127.97	127.23	139.21	111.36	83.00	57.60	27.94	32.24	37.92	73.16	75.84	84.57	978
Demanda de agua (m³/mes)	16,789	16,693	18,264	14,610	10,889	7,557	3,666	4,230	4,975	9,599	9,950	11,095	128318
Demanda de agua por semana (m³/semana)	3,791	4,173	4,124	3,409	2,459	1,763	828	955	1,161	2,167	2,322	2,505	2472
ks													
0.4													
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Área jardines (ha)	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
ETo (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.8	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Coefficiente de jardín (KJ)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
ETJ (mm/día)	1.55	1.70	1.68	1.39	1.00	0.72	0.68	0.78	0.95	1.18	1.26	1.36	1.19
Lamina neta (mm/mes)	47.99	47.71	52.20	41.76	31.12	21.60	20.96	24.18	28.44	36.58	37.92	42.28	433
Ef. De riego	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.90
Lamina Bruta (mm/día)	1.72	1.89	1.87	1.55	1.12	0.80	0.75	0.87	1.05	1.31	1.40	1.52	1.32
Lamina Bruta (mm/mes)	53.32	53.01	58.00	46.40	34.58	24.00	23.28	26.87	31.60	40.64	42.13	46.98	481
Demanda de agua (m³/mes)	1,109	1,103	1,206	965	719	499	484	559	657	845	876	977	10001
Demanda de agua por semana (m³/semana)	250	276	272	225	162	116	109	126	153	191	204	221	2308
Descripción	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Demanda total de agua (m³/mes)	17,898	17,796	19,471	15,576	11,609	8,056	4,150	4,789	5,632	10,444	10,827	12,073	138320
Demanda total de agua por semana (m³/semana)	4,042	4,449	4,397	3,634	2,621	1,880	937	1,081	1,314	2,358	2,526	2,726	2664
Oferta de agua (m³/mes)	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	233280
Oferta de agua por semana (m³/semana)	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860
Balance de agua (m³/mes)	1,542	1,644	-31	3,864	7,831	11,384	15,290	14,651	13,808	8,996	8,613	7,367	94960
Balance de agua por semana (m³/semana)	818	411	463	1,226	2,239	2,980	3,923	3,779	3,546	2,502	2,334	2,134	26354

f) Escenarios requerimiento cesped, riego por goteo (ks por estaciones 0.8,0.8, 0.4 ,0.6 y Ef. 0.9 y cubre suelos (ks 0.4 y ef. 0.9)													
	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Área jardines (ha)	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12	13.12
ETo (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.8	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Coefficiente de jardín (KJ)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.65
ETJ (mm/día)	3.10	3.41	3.37	2.78	2.01	1.44	0.68	0.78	0.95	1.77	1.90	2.05	2.02
Lamina neta (mm/mes)	95.98	95.42	104.41	83.52	62.25	43.20	20.96	24.18	28.44	54.87	56.88	63.43	734
Ef. De riego	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.90
Lamina Bruta (mm/día)	3.44	3.79	3.74	3.09	2.23	1.60	0.75	0.87	1.05	1.97	2.11	2.27	2.24
Lamina Bruta (mm/mes)	106.64	106.03	116.01	92.80	69.16	48.00	23.28	26.87	31.60	60.97	63.20	70.47	815
Demanda de agua (m ³ /mes)	13,991	13,911	15,220	12,175	9,074	6,298	3,055	3,525	4,146	7,999	8,292	9,246	106932
Demanda de agua por semana (m ³ /semana)	3,159	3,478	3,437	2,841	2,049	1,469	690	796	967	1,806	1,935	2,088	2060
ks													
0.4													
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Área jardines (ha)	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
ETo (mm/día)	3.87	4.26	4.21	3.48	2.51	1.8	1.69	1.95	2.37	2.95	3.16	3.41	2.97
Coefficiente de jardín (KJ)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
ETJ (mm/día)	1.55	1.70	1.68	1.39	1.00	0.72	0.68	0.78	0.95	1.18	1.26	1.36	1.19
Lamina neta (mm/mes)	47.99	47.71	52.20	41.76	31.12	21.60	20.96	24.18	28.44	36.58	37.92	42.28	433
Ef. de riego	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.90
Lamina Bruta (mm/día)	1.72	1.89	1.87	1.55	1.12	0.80	0.75	0.87	1.05	1.31	1.40	1.52	1.32
Lamina Bruta (mm/mes)	53.32	53.01	58.00	46.40	34.58	24.00	23.28	26.87	31.60	40.64	42.13	46.98	481
Demanda de agua (m ³ /mes)	1,109	1,103	1,206	965	719	499	484	559	657	845	876	977	10001
Demanda de agua por semana (m ³ /semana)	250	276	272	225	162	116	109	126	153	191	204	221	2308
ks													
0.4													
Descripción	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom/Acum
Demanda total de agua (m ³ /mes)	15,100	15,013	16,427	13,140	9,794	6,797	3,539	4,084	4,803	8,844	9,168	10,223	116933
Demanda total de agua por semana (m ³ /semana)	3,410	3,753	3,709	3,066	2,211	1,586	799	922	1,121	1,997	2,139	2,308	2252
Oferta de agua (m ³ /mes)	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	19440	233280
Oferta de agua por semana (m ³ /semana)	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860	4860
Balance de agua (m ³ /mes)	4,340	4,427	3,013	6,300	9,646	12,643	15,901	15,356	14,637	10,596	10,272	9,217	116347
Balance de agua por semana (m ³ /semana)	1,450	1,107	1,151	1,794	2,649	3,274	4,061	3,938	3,739	2,863	2,721	2,552	31297

Anexo 6: Controladores y electroválvulas



SISTEMAS DE PROGRAMACION

PROGRAMADOR DE DECODIFICADORES ESP-LXD

Programador-satélite bifilar para la plataforma IQ Cloud

- Actualización del programador a la plataforma IQ
- Basta con agregar un cartucho de comunicaciones en red (GPRS, Wifi o Ethernet), y suscribirse en www.rainbird.eu
- Beneficiarse inmediatamente de todas las prestaciones de IQ Cloud e IQ Móvil para teléfonos inteligentes y tabletas



SISTEMAS DE PROGRAMACION



PROGRAMADOR ESP-LXME

Programador-satélite tradicional de 24 V para la plataforma IQ Cloud

- Actualización del programador a la plataforma IQ Cloud
- Basta con agregar un cartucho de comunicaciones en red (GPRS, Wifi o Ethernet), y suscribirse en www.rainbird.eu
- Beneficiarse inmediatamente de todas las prestaciones de IQ Cloud e IQ Móvil para teléfonos inteligentes y tabletas



Cartucho inteligente ET Manager™

El controlador ESP-LXD se puede actualizar a un controlador inteligente con ajuste de clima con la adición del cartucho ETC-LX ET Manager. El juego de actualización del ET Manager incluye un cartucho que se instala en la parte posterior del panel frontal del controlador y una antena que se instala a través de un orificio prepunzonado en la parte superior de la caja del controlador. El receptor ETM recopila los datos del sensor meteorológico de la estación cada hora a través de una señal inalámbrica de envío de mensajes. Estos datos se usan para calcular el valor de evapotranspiración (ET) y el riego se ajusta automáticamente para aplicar sólo la cantidad de agua necesaria.

Cartucho inteligente ETC-LX ET Manager



Decodificadores y la vía de dos cables

Vía de dos cables

Los sistemas de control basados en decodificadores, tal como el ESP-LXD, se conectan a las válvulas y a otros equipos de riego a través de decodificadores a lo largo de una vía de dos cables. Aunque el patrón de "bucle" de las instalaciones de dos cables permiten vías de cables más largas, los patrones de "estrella" se usan con más frecuencia. Cuando se usa un cable Maxi 14-2, el ESP-LXD funciona con una vía de cables de hasta 2.66 km (1.65 millas) para las instalaciones con patrón de "estrella" y hasta 10.63 km (6.61 millas) para instalaciones de "bucle".

La protección contra la filtración de agua es esencial para las instalaciones de dos cables. Diseñado para ser resistente a la filtración de agua, el Maxi-Cable™ de Rain Bird (con doble funda) se usa para las instalaciones de vía de dos cables. Una adecuada técnica de empalme para todos los empalmes a lo largo de la vía de dos cables, para los empalmes de los decodificadores a la vía de dos cables y para el empalme de los decodificadores a las válvulas y a otros equipos son igualmente críticos. Se deben usar juegos de empalmes tales como los conectores Rain Bird DB (entierro directo).

Decodificadores

Los decodificadores se instalan a lo largo de la vía de dos cables para conectarse con las válvulas y otros equipos. El ESP-LXD soporta decodificadores de campo, para el control de válvulas de estación y válvulas maestras, y decodificadores de sensor, para conectarse con sensores de flujo y meteorológicos. Todos los decodificadores Rain Bird tienen direcciones únicas de cinco dígitos para permitir al controlador manejar un dispositivo particular, tal como una válvula.

Decodificadores de sensor

Rain Bird también ofrece un decodificador de sensor SD210TURF para crear una interfaz con el sensor meteorológico o de flujo. Cuando un SD-210 se cablea a un sensor meteorológico junto con una vía de dos cables, esto ofrece una supervisión en tiempo real del estado del sensor meteorológico. Un SD-210 cableado a un sensor de flujo monitorea el caudal actual en un flujo de monitoreo enviando impulsos al controlador.

Protección contra sobretensiones

Una adecuada conexión a tierra y la protección contra sobretensiones son esenciales para las instalaciones de dos cables. Una vía de dos cables debe estar protegida contra sobretensiones y puesta a tierra cada 150 metros (500 pies) o cada 8 decodificadores, el que sea menor. El protector contra sobretensiones de la línea LSP1TURF se usa para este propósito, pero los decodificadores de campo FD-401 y FD-601 incluyen protección contra sobretensiones, así que los LSP-1 son innecesarios cuando se han puesto a tierra y se usan los decodificadores de campo FD-401 y FD-601. Puesto que los protectores contra sobretensiones de la línea LSP-1 sólo se usan para proteger contra las sobretensiones, no tienen direcciones de decodificadores.

Decodificadores de campo

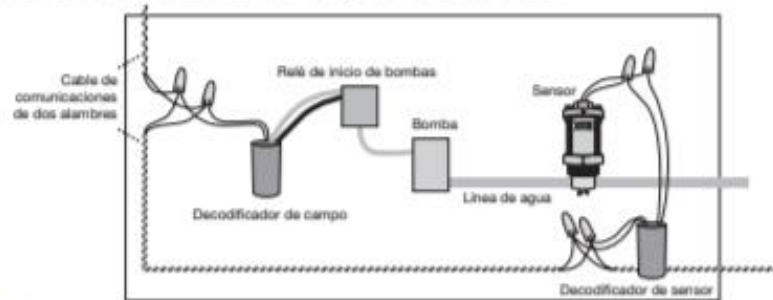
Los decodificadores de campo se usan para abrir y cerrar válvulas de estación y válvulas maestras que se usan para riego y son los decodificadores de uso más común en la mayoría de las instalaciones de dos cables. Rain Bird ofrece cinco modelos de decodificadores de campo, incluyendo el FD-101 que controla una única válvula con una dirección única, y otros cuatro modelos capaces de controlar válvulas múltiples:

Modelo de decodificador	Número de direcciones por decodificador	Número máximo de solenoides por dirección	Máximo de direcciones funcionando simultáneamente
FD101TURF	1	1	1
FD102TURF	1	2	1
FD202TURF	2	2	2
FD401TURF*	4	1	4
FD601TURF*	6	1	4

* El decodificador incluye protección contra sobretensiones de la línea.

El controlador ESP-LXD maneja hasta 5 válvulas maestras y es compatible tanto con las válvulas maestras normalmente abiertas como con las válvulas maestras normalmente cerradas.

El ESP-LXD también soporta el uso de bombas. Éstas están configuradas y controladas por el controlador en la misma forma que las válvulas maestras, excepto que el decodificador de campo está cableado a un relé de inicio de bomba en lugar de a una válvula maestra.



Rain Bird recomienda el uso del decodificador de campo FD-101 para la mayoría de los relés de inicio de bomba y un FD-102 para bombas más grandes (3/4 HP y más grandes).



SERIE PGA

Electroválvulas - ¡Construidas para durar... y durar!

- Configuración en línea y ángulo para aplicaciones residenciales y comerciales. La serie PGA le ofrece flexibilidad en el diseño e instalación a un precio asequible
- Membrana reforzada de fábrica para mayor duración
- Funcionamiento duradero y fiable: construcción en PVC resistente

CARACTERÍSTICAS

• Facilidad de mantenimiento

- Evita la pérdida de piezas durante el mantenimiento gracias al solenoide encapsulado con émbolo cautivo
- Maneta de ajuste del caudal no emergente para regular el caudal deseado
- Purgado interno girando ¼ de vuelta el solenoide que permite aperturas manuales sin mojar la arqueta. Permite el ajuste del regulador de presión sin encender la válvula en el programador
- Solenoide con maneta

• Versatilidad

- Se puede instalar un módulo regulador de presión PRS-Dial ajustable desde 1,0 a 6,9 bares (se debe pedir por separado)
- También disponible en versión con solenoide de impulsos de 9V instalado: 100-PGA-9V, 150-PGA-9V y 200-PGA-9V
- Compatible con los sistemas de decodificadores Rain Bird MDC

• Fiabilidad

- Válvula de cierre lento que previene golpes de ariete y por lo tanto daños en el sistema
- Diseño con doble filtración para evitar la obstrucción de los puertos del solenoide

ESPECIFICACIONES

Caudal: 1,14 a 34,05 m³/h
 Presión: 1,0 a 10,4 bar (23° C)
 Temperatura: hasta 43°C

ESPECIFICACIONES ELECTRICAS

Solenoide: 24 VAC - 50 Hz
 Corriente de arranque: 0,41 A (9,9 VA)
 Corriente de régimen: 0,23 A (5,5 VA)

DIMENSIONES

100-PGA
 Altura: 18,4 cm
 Longitud: 14,0 cm
 Ancho: 8,3 cm

150-PGA
 Altura: 20,3 cm
 Longitud: 17,2 cm
 Ancho: 8,9 cm

200-PGA
 Altura: 25,4 cm
 Longitud: 19,7 cm
 Ancho: 12,7 cm

Nota: El PRS-Dial instalado aumenta en 5 cm la altura de la válvula

MODELOS

100-PGA: 1" (26/34) BSP rosca hembra
 100-PGA-9V: 1" (26/34) rosca hembra, solenoide de impulsos
 150-PGA: 1,5" (40/49) BSP rosca hembra
 150-PGA-9V: 1,5" (40/49) rosca hembra, solenoide de impulsos
 200-PGA: 2" (50/60) BSP rosca hembra
 200-PGA-9V: 2" (50/60) rosca hembra, solenoide de impulsos

ACCESORIOS

PRS-Dial: Módulo de regulador de presión con ajuste de presión desde 1,0 a 6,9 bares

RANGO DE PRESIONES

Temperatura del agua	Presión máxima
23°C	10,4 bares
27°C	8,1 bares
32°C	7,7 bares
38°C	6,4 bares
43°C	5,2 bares

150-PGA		
m ³ /h	Línea	Ángulo
6	0,10	0,07
9	0,22	0,14
12	0,38	0,21
15	0,61	0,36
18	0,86	0,51
21	1,16	0,70



Cómo especificar

100 - PGA



RENDIMIENTOS: Pérdidas de carga (bares)

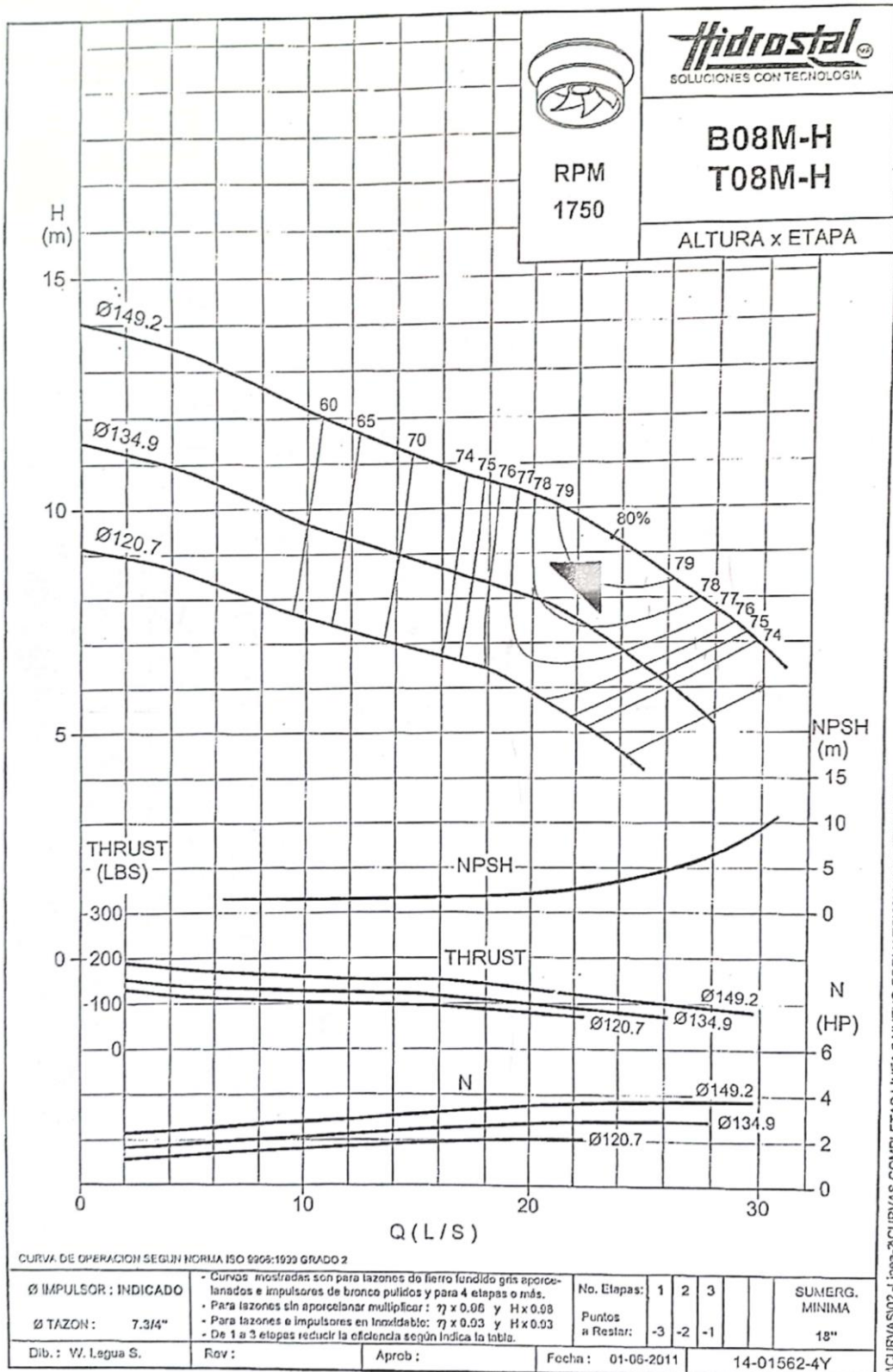
100-PGA		
m ³ /h	Línea	Ángulo
1,2	0,38	0,18
1	0,41	0,41
6	0,43	0,43
9	0,48	0,48

200-PGA		
m ³ /h	Línea	Ángulo
9	0,08	0,07
12	0,13	0,07
15	0,17	0,10
18	0,24	0,13
21	0,33	0,18
24	0,40	0,23
27	0,54	0,30
30	0,66	0,36
34	0,83	0,45

* Los valores de pérdidas de carga están tomados con el regulador de caudal totalmente abierto

Anexo 7: Curva de la bomba, placas de motor, placa de la bomba y familias de ADT & Q y Kw & Q para diferentes velocidades de la bomba.

Fuente : Hidrostral (2015)





Placa de la bomba



Placa del Motor



	60	1750	RPM		55	1604	RPM		54	1575	RPM		52	1517	RPM
Tornos	Caudal (l/s)	ADT (m)	Potencia (kW)		Caudal (l/s)	ADT (m)	Potencia (kW)		Caudal (l/s)	ADT (m)	Potencia (kW)		Caudal (l/s)	ADT (m)	Potencia (kW)
1	19.00	82.45	26.98		17.42	69.28	20.78		17.10	66.79	19.67		16.47	61.93	17.56
2	26.00	65.76	36.92		23.83	55.26	28.44		23.40	53.26	26.91		22.53	49.39	24.03
3	26.80	63.64	38.06		24.57	53.48	29.31		24.12	51.55	27.74		23.23	47.80	24.77
4	27.00	63.11	38.34		24.75	53.03	29.53		24.30	51.12	27.95		23.40	47.40	24.96
5	26.00	65.76	36.92		23.83	55.26	28.44		23.40	53.26	26.91		22.53	49.39	24.03
6	27.00	63.11	38.34		24.75	53.03	29.53		24.30	51.12	27.95		23.40	47.40	24.96
7	26.20	65.23	37.20		24.02	54.81	28.66		23.58	52.84	27.12		22.71	49.00	24.22
8	27.60	61.49	39.19		25.30	51.67	30.19		24.84	49.80	28.57		23.92	46.18	25.51
9	24.60	69.36	34.93		22.55	58.28	26.91		22.14	56.18	25.47		21.32	52.10	22.74
10	25.90	66.02	36.78		23.74	55.48	28.33		23.31	53.48	26.81		22.45	49.59	23.94
11	26.70	63.91	37.91		24.48	53.70	29.20		24.03	51.77	27.64		23.14	48.00	24.68
12	30.00	54.76	42.60		27.50	46.02	32.81		27.00	44.36	31.06		26.00	41.13	27.73
13	27.00	63.11	38.34		24.75	53.03	29.53		24.30	51.12	27.95		23.40	47.40	24.96
14	27.00	63.11	38.34		24.75	53.03	29.53		24.30	51.12	27.95		23.40	47.40	24.96
15	21.30	77.33	30.25		19.53	64.98	23.30		19.17	62.63	22.05		18.46	58.08	19.69
16	23.90	71.11	33.94		21.91	59.75	26.14		21.51	57.60	24.74		20.71	53.41	22.09
17	26.00	65.76	36.92		23.83	55.26	28.44		23.40	53.26	26.91		22.53	49.39	24.03
18	25.60	66.80	36.35		23.47	56.13	28.00		23.04	54.11	26.50		22.19	50.17	23.66
19	25.50	67.06	36.21		23.38	56.35	27.89		22.95	54.32	26.40		22.10	50.37	23.57
20	24.80	68.85	35.22		22.73	57.85	27.13		22.32	55.77	25.67		21.49	51.71	22.92
21	26.70	63.91	37.91		24.48	53.70	29.20		24.03	51.77	27.64		23.14	48.00	24.68
22	28.00	60.39	39.76		25.67	50.75	30.63		25.20	48.92	28.99		24.27	45.36	25.88
23	24.40	69.86	34.65		22.37	58.70	26.69		21.96	56.59	25.26		21.15	52.47	22.55
24	24.60	69.36	34.93		22.55	58.28	26.91		22.14	56.18	25.47		21.32	52.10	22.74
25	25.50	67.06	36.21		23.38	56.35	27.89		22.95	54.32	26.40		22.10	50.37	23.57
26	27.47	61.68	39.01		25.18	51.83	30.05		24.72	49.96	28.44		23.81	46.33	25.39
27	18.79	82.91	26.68		17.22	69.67	20.55		16.91	67.16	19.45		16.28	62.27	17.37
28	17.93	84.71	25.47		16.44	71.18	19.62		16.14	68.62	18.57		15.54	63.63	16.58
29	29.04	57.31	41.24		26.62	48.16	31.77		26.14	46.42	30.07		25.17	43.05	26.85
30	22.24	75.13	31.58		20.39	63.13	24.33		20.02	60.86	23.02		19.27	56.43	20.56

Anexo 8: Resumen del artículo científico publicado

Scientia Agropecuaria 10(2): 207 – 216 (2019)



Scientia Agropecuaria

Website: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias
Universidad Nacional de
Trujillo

Coefficientes de riego del césped americano (*Stenotaphrum secundatum*) en condiciones de estrés hídrico utilizando riego por goteo subterráneo

Irrigation coefficients of turfgrass (*Stenotaphrum secundatum*) in arid conditions, under water stress using subsurface drip irrigation

David Ascencios^{1*}; Néstor Montalvo¹; Karem Meza²; Astrid Cifuentes³

¹ Programa de Maestría en Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú.

² Programa de Maestría en Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina. (UNALM), Lima, Perú.

³ Condominio La Quebrada, Oficina Recursos hídricos, Lima, Perú.

Received October 17, 2018. Accepted May 17, 2019.

Resumen

El trabajo de investigación tuvo como objetivo obtener los coeficientes de riego del césped americano, se evaluaron 1,0; 0,8; 0,6 y 0,4 de la evapotranspiración potencial para cada estación durante un año. Las variables climáticas fueron monitoreadas por una estación automática y se utilizó el riego por goteo subterráneo, no se presentó intrusión de las raíces en los laterales de riego. Para el monitoreo de la distribución de humedad se utilizaron sensores TDR, obteniéndose coeficientes de uniformidad entre el 90 a 92 %. El monitoreo de la humedad en el tiempo y el estado energético se realizó mediante sensores FDR y curvas pF. La calidad visual fue evaluada mediante el color, uniformidad y cobertura, esta última apoyada en imágenes digitales. Se ensayaron diferentes coeficientes de riego para cada estación. Finalmente se seleccionaron los coeficientes que permitieron mantener al césped con bajo requerimiento de agua y mantenimiento, así como una buena calidad visual, aplicando el Proceso de Análisis Jerárquico. Los coeficientes seleccionados fueron: 0,8; 0,8; 0,4 y 0,6 de la ETo para la verano, otoño, invierno y primavera respectivamente, obteniendo con ellos una adecuada calidad visual y un ahorro del volumen agua del 31%.

Palabras clave: Césped americano; proceso de análisis jerárquico; coeficiente de riego; riego deficitario; requerimientos de agua.

Abstract

The research work had the objective to obtain the irrigation coefficients of Saint Augustine turfgrass, were evaluated 1.0; 0.8; 0.6 and 0.4 of the potential evapotranspiration for each season during the year. Climatic variables were monitored by an automatic station and sub-surface drip irrigation was used, no intrusion of the roots into the irrigation hoses and drips. To monitor the moisture distribution, TDR sensors were used, a uniformity coefficient between 90 and 92% was obtained. Moisture monitoring during the time and energy status were used FDR sensors and pF curves. Visual quality was evaluated through color, uniformity and coverage, the last one supported by digital images. Different irrigation coefficients were presented for each season. Finally, the coefficients that allowed keeping the turfgrass with low water requirement and maintenance were selected, as well as a good visual quality by applying the Hierarchical Analysis Process, the coefficients selected were: 0.8; 0.8; 0.4 and 0.6 of the ETo for the summer, autumn, winter and spring respectively, obtaining an adequate visual quality and a water volume saving of 31%.

Keywords: Saint Augustine; hierarchical analysis process; irrigation coefficient; deficit irrigation; water requirements.

How to cite this article:

Ascencios, D.; Montalvo, N.; Meza, K.; Cifuentes, A. 2019. Coeficientes de riego del césped americano (*Stenotaphrum secundatum*) en condiciones de estrés hídrico utilizando riego por goteo subterráneo. *Scientia Agropecuaria* 10(2): 207 – 216.

* Corresponding author
E-mail: dascencios@lamolina.edu.pe (D. Ascencios).

© 2019 All rights reserved
DOI: 10.17268/sci.agropecu.2019.02.06