

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LAS PROPIEDADES
DE SUELO, CÉSPED Y UNIFORMIDAD DE RIEGO PARA EL
USO EFICIENTE DEL AGUA”**

Presentada por:

KAREM BELEN MEZA CAPCHA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN
RECURSOS HÍDRICOS**

Lima – Perú

2020

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS

**“VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LAS PROPIEDADES DE
SUELO, CÉSPED Y UNIFORMIDAD DE RIEGO PARA EL USO
EFICIENTE DEL AGUA”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO

MAGISTER SCIENTIAE

Presentada por:

KAREM BELEN MEZA CAPCHA

Sustentada ante el siguiente jurado:

Dr. Jesús Abel Mejía Marcacuzco

PRESIDENTE

Mg.Sc. David Ascencios Templo

ASESOR

Ph.D. Eduardo Chávarri Velarde

MIEMBRO

Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo

MIEMBRO

DEDICATORIA

A mis padres y hermana

AGRADECIMIENTOS

- Al Ing. David Ascencios Templo por sus valiosas sugerencias al presente trabajo.
- Al Dr. Eduardo Chávarri Velarde y Dr. Néstor Montalvo Arquñigo por contribuir en la mejora del presente trabajo.
- Al Programa de Maestría en Recursos Hídricos por contribuir a mi formación profesional.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. CÉSPED	4
2.1.1. BENEFICIOS	4
2.2. MANTENIMIENTO DE CÉSPED EN CAMPOS DEPORTIVOS Y ÁREAS DE RECREACIÓN	5
2.2.1. CORTE DE CÉSPED.....	5
2.2.2. RIEGO POR ASPERSIÓN	7
2.2.3. AIREACIÓN	8
2.2.4. DETHATCHING O CONTROL DE ESPESOR DE FIELTRO	10
2.3. CÉSPED PARA CAMPOS DEPORTIVOS	11
2.4. PRUEBAS DE RENDIMIENTO EN CAMPOS DEPORTIVOS DE CÉSPED NATURAL	12
2.4.1. RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN O COMPACTACIÓN	13
2.4.2. CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA DEL SUELO	15
2.4.3. EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA	16
2.5. AUDITORIAS DE RIEGO TRADICIONAL.....	18
2.5.1. UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN DE RIEGO (UD)	19
2.6. UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN DE RIEGO EN BASE AL VOLUMEN DE AGUA EN COLECTORES Y CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA EN EL SUELO	22
2.7. MANEJO ESPECIFICO DE CAMPOS CON EL USO DE SENSORES PORTÁTILES.....	24
2.8. LA GEOESTADÍSTICA	25
2.8.1. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO	25
2.8.2. VARIOGRAMA.....	26
2.8.3. MODELOS DE SEMIVARIOGRAMA	32
a. <i>Modelo esférico</i>	32
b. <i>Modelo exponencial</i>	33
2.8.4. KRIGING	34
2.9. ELABORACIÓN DE MAPAS DE UNIDADES ESPECÍFICAS DE MANEJO DE ÁREA O SITE-SPECIFIC MANAGEMENT UNITS (SSMUs).....	35
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
3.1. UBICACIÓN	36
3.2. SUELO.....	36

3.3. CLIMA.....	36
3.4. AGUA.....	37
3.5. SISTEMA DE RIEGO.....	37
3.6. UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN.....	37
3.7. SENSORES PORTÁTILES.....	38
3.8. GRILLADO.....	39
3.9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	40
3.10. MAPAS DE SUPERFICIE.....	40
3.11. EVALUACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE θ_v , RP Y NDVI.....	41
3.12. DEPENDENCIA ESPACIAL.....	41
3.13. “SITE-SPECIFIC MANAGEMENT UNITS” (SSMUs) O UNIDADES ESPECÍFICAS DE MANEJO DE ÁREA.....	42
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1. SUELO Y CÉSPED.....	43
4.2. TAMAÑO DE GRILLA PARA MUESTREO DEL VOLUMEN DE AGUA EN LOS COLECTORES (VAC), EL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA DEL SUELO (θ_v), LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN (RP) Y EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI).....	43
4.3. COMPARACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN DEL CUARTO INFERIOR DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA DEL SUELO (θ_v) Y VOLUMEN DE AGUA EN LOS COLECTORES (VAC).....	44
4.4. EVALUACIÓN ESPACIO TEMPORAL DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA DEL SUELO (θ_v), LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN (RP) Y EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI).....	46
4.4.1. GEOESTADÍSTICA.....	49
4.4.2. MAPAS DE UNIDADES ESPECÍFICAS DE MANEJO O “SITE-SPECIFIC MANAGEMENT UNITS (SSMUs)” DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA DEL SUELO (θ_v), LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN (RP) Y EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI).....	53
4.4.3. APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ÁREAS VERDES URBANAS UTILIZANDO LAS SITE-SPECIFIC MANAGEMENT UNITS (SSMUs).....	62

4.4.4. EFECTO DEL VOLUMEN DE AGUA EN LOS COLECTORES (VAC), LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN (RP) Y EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) SOBRE EL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA DEL SUELO (θ_v)	68
4.5. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA DEL SUELO (θ_v), LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN (RP) Y EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)	70
V. CONCLUSIONES	72
VI. RECOMENDACIONES	73
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	74
VIII. ANEXOS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Efecto del corte de césped en el desarrollo de altura de raíces.....	6
Figura 2: Chorro de agua de rotor serie 5000.....	8
Figura 3: Cañón emergente VYR.....	8
Figura 4: Sensor de compactación del suelo SC 900.....	14
Figura 5: (a) Pantalla de medición del TDR 350 y sensor de humedad de suelo TDR.....	16
Figura 6: Calidad de hoja según el nivel de reflectancia.....	17
Figura 7: Prueba de medidor de calidad de césped TCM 500 NDVI.....	17
Figura 8: Efecto de la presión correcto, bajo y alto en el funcionamiento del aspersor.....	21
Figura 9: (a) Nube de puntos del semivariograma de humedad de suelo y (b) grilla de datos de la variable humedad de suelo.....	26
Figura 10: Distancia del Lag y Bins.....	28
Figura 11: Nube de puntos del semivariograma.....	28
Figura 12: Relación entre pares de puntos.....	29
Figura 13: Bins en cada celda de la grilla.....	29
Figura 14: Superficie del semivariograma de la variable humedad de suelo.....	30
Figura 15: Semivariograma experimental de la variable humedad de suelo.....	31
Figura 16: Comportamiento típico de un semivariograma acotado.....	31
Figura 17: Modelo esférico.....	33
Figura 18: Modelo exponencial.....	33
Figura 19: (a) Estadio Nacional grillado 10 m x 5 m y (b) UNALM grillado 3 m x 3 m.....	40
Figura 20. Mapas con las “Site-Specific Management Units (SSMUs)” de acuerdo a la clasificación Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A) para cada día del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para los días 1, 4 y 9 del periodo seco en el campo deportivo del Estadio Nacional.....	55
Figura 21. Mapas con las “Site-Specific Management Units (SSMUs)” de acuerdo a la clasificación Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A) para cada día del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para los días 1, 5 y 8 del periodo seco en el área verde urbana en estudio de la UNALM.....	59

Figura 22: (a) Estadio Nacional grillado Estadio Nacional, (a) y (b) mapas de la variabilidad espacial del volumen de agua en los colectores (VAC) correspondiente al 04/06/2018 y del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) correspondiente al 28/06/2018; y Site-Specific Management Units de acuerdo a la clasificación: Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).	63
Figura 23: UNALM, (a) y (b) mapas de la variabilidad espacial del volumen de agua en los colectores (VAC) correspondiente al 19/05/2018 y del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) correspondiente al 07/04/2018; y Site-Specific Management Units de acuerdo a la clasificación: Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).....	63
Figura 24: Estadio Nacional, (a) y (b) mapas de la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración (RP) correspondiente al 28/06/2018 e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente al 28/06/2018; y mapas de Site-Specific Management Units de acuerdo a la clasificación Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).....	67
Figura 25: UNALM, (a) y (b) mapas de la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración (RP) correspondiente al 07/04/2018 e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente al 07/04/2018; y mapas de Site-Specific Management Units acuerdo a la clasificación Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Temperatura promedio en °C según el tipo de superficie.	4
Tabla 2. Tolerancia de alturas mínimas y máximas para el corte de césped.....	6
Tabla 3. Tipos de aireación de suelo en campos de fútbol.....	9
Tabla 4. Rangos de resistencia a la penetración	15
Tabla 5. Clasificación de la uniformidad de distribución del cuarto inferior para áreas verdes urbanas con sistema de riego por aspersión.	19
Tabla 6. Clasificación de la uniformidad de distribución del cuarto inferior para áreas verdes urbanas con sistema de riego por aspersión.	20
Tabla 7. Cuadro comparativo entre colectores (auditoria tradicional) versus TDR 300 (sensor de humedad de suelo).....	24
Tabla 8. Tipos de interpolación kriging y sus propiedades	34
Tabla 9. Fecha de muestreo, dimensiones del área, especie de césped, densidad aparente y textura de suelo para el Estadio Nacional y UNALM.....	43
Tabla 10. Uniformidad de distribución del cuarto inferior (Du_{1q}) del contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) y el volumen de agua en los colectores (VAC) después del riego; y factor de corrección para el tiempo de riego (SM) en el Estadio Nacional y la UNALM. .	45
Tabla 11. Condiciones de climáticas cuando fueron recolectados los datos para la uniformidad de distribución de contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) y el volumen de agua en los colectores (VAC) en el Estadio Nacional y UNALM.	45
Tabla 12. Descripción estadística del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para cada día del periodo de monitoreo en el campo deportivo del Estadio Nacional y UNALM	47
Tabla 13. Parámetros del semivariograma del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para cada día del periodo seco en el campo deportivo del Estadio Nacional.	51
Tabla 14. Descripción estadística y porcentaje de las “Site-Specific Management Units (SSMUs)” para la gestión del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para cada día del periodo seco en el campo deportivo del Estadio Nacional, la clasificación de las unidades fue Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).....	56

Tabla 15. Descripción estadística y porcentaje de las “Site-Specific Management Units (SSMUs)” para la gestión del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para cada día del periodo seco en la UNALM, la clasificación de las unidades fue Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A)	60
Tabla 16. Porcentaje de área de las SSMUs del volumen de agua en colectores (VAC) y el contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) en el Nacional y la UNALM, la clasificación de las unidades fue Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).	65
Tabla 17. Porcentaje de área de las SSMUs de la resistencia a la penetración (RP) e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el Estadio Nacional y la UNALM, la clasificación de las unidades fue Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).	68
Tabla 18. Modelo de regresión lineal múltiple para el Estadio Nacional y la UNALM para predecir el contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) en base al volumen de agua en los colectores (VAC), la resistencia a la penetración (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).	69
Tabla 19. Correlación de Pearson del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para cada día del periodo seco en el campo deportivo del Estadio Nacional y área de estudio de la UNALM.	71

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: UNALM y Estadio Nacional	85
Anexo 2: Suelo Probetas con 6 muestras de suelo del estadio nacional para la prueba de Bouyoucos.....	86
Anexo 3: Muestras de suelo y césped realizadas en el estadio nacional	87
Anexo 4: Sistema de riego por aspersión del estadio nacional, (a) cabezal de riego, (b) cañón de riego encendido.	88
Anexo 5: Componentes del sistema de riego por aspersión de la UNALM, (a) filtro de malla, (b) controladores de riego.....	89
Anexo 6: Hojas técnica del cañón del sistema de riego del Estadio Nacional	90
Anexo 7: Informe técnico del (a) análisis físico y (b) microbiológico del agua de riego de la UNALM.....	92

RESUMEN

El volumen de agua en los colectores (VAC), el contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), la resistencia a la penetración (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) son variables para el manejo de césped. El enfoque del trabajo se centra en la integración de la tecnología como el uso de sensores y las aplicaciones prácticas de agricultura de precisión en las áreas verdes, utilizando las Site-Specific Management Units (SSMUs) en el campo deportivo del Estadio Nacional y área recreacional de la UNALM. Los objetivos del presente trabajo fueron comparar la uniformidad de distribución (DUIq) en base al VAC y el θ_v , realizar mapas espacio temporales del θ_v , RP y NDVI; y calcular los coeficientes de correlación entre el θ_v , RP y NDVI. Los resultados indicaron que la DUIq en base al θ_v fue mayor que la DUIq en base al VAC. En el Estadio Nacional, suelo de textura arenoso franco, la correlación entre la RP y el θ_v fue negativa, es decir a medida que el θ_v suelo decrece la RP aumenta. En la UNALM, suelo de textura franco arenoso, la correlación entre la RP y el θ_v fue negativo, y la correlación entre el NDVI y el θ_v fue positivo, es decir el θ_v y el NDVI decrece a medida que la RP aumente. El uso de los mapas de las SSMUs del VAC, el θ_v , la RP, el NDVI son una aplicación práctica de la agricultura de precisión en áreas verdes, los cuales proporcionan información específica del campo que permite tomar decisiones en el manejo, como la corrección de las deficiencias del sistema de riego en la distribución del agua, la identificación de áreas que requieran aireación del suelo, visualización de la calidad de césped, aplicación de riegos suplementarios e implementación de estrategias que permitan mejorar la uniformidad de distribución de riego.

Palabras claves: césped, uniformidad de distribución, agricultura de precisión.

ABSTRACT

The volume of water in the collectors (VAC), the volumetric content of soil water (θ_v), the resistance to penetration (RP) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) are variable for lawn management. The focus of the work focuses on the integration of technology such as the use of sensors and practical applications of precision agriculture in green areas, using the Site-Specific Management Units (SSMUs) in the National Stadium sports field and recreational area of the UNALM. The objectives of the present work were to compare the distribution uniformity (DUIq) based on the VAC and the θ_v , to make temporary space maps of the θ_v , RP and NDVI; and calculate the correlation coefficients between θ_v , RP and NDVI. The results indicated that the DUIq based on θ_v was higher than the DUIq based on the VAC. In the National Stadium, frank sandy soil, the correlation between the RP and the θ_v was negative, that is, as the θ_v soil decreases the RP increases. In the UNALM, sandy loam soil, the correlation between the RP and the θ_v was negative, and the correlation between the NDVI and the θ_v was positive, that is, the θ_v and the NDVI decreases as the RP increases. The use of the maps of the SSMUs of the VAC, the θ_v , the RP, the NDVI are a practical application of precision agriculture in green areas, which provide specific field information that allows management decisions, such as correction of the deficiencies of the irrigation system in the distribution of water, the identification of areas that require aeration of the soil, visualization of the quality of grass, application of supplementary irrigation and implementation of strategies to improve the uniformity of irrigation distribution.

Keywords: grass, distribution uniformity, precision agriculture

I. INTRODUCCIÓN

La escasez , el alto precio de agua y energía, y el cambio de las condiciones ambientales (Chen et al., 2015) en las zonas desérticas como la ciudad de Lima, capital del Perú, genera la obligación de optimizar el uso del agua (Romero et al., 2012; Goap et al., 2018; Zhu et al., 2018) . La implementación de sistemas de riego automáticos remotos y la programación de riego en base a la evapotranspiración, la agricultura de precisión en áreas verdes urbanas mejora la operación y mantenimiento, además de reducir el consumo de agua , fertilizantes y otros insumos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un índice de $9\text{m}^2/\text{hab}$ para contar con un hábitat saludable y un desarrollo sostenible de las ciudades. Lima tiene $3,5\text{m}^2/\text{hab}$, producto de la urbanización no planificada y explosiva a partir de la segunda mitad del siglo XX. La población se incrementa en las ciudades a nivel mundial y dependen de la naturaleza para su supervivencia; es decir, de los ecosistemas, fuera y dentro de los límites de la ciudad, como son las áreas verdes urbanas que brindan servicios ecosistémicos, sin embargo, el incremento y/o mantenimiento de las áreas verdes urbanas, se complica debido a la competencia entre los sectores usuarios del agua.

En Lima, las áreas verdes urbanas brindan múltiples beneficios, económicos, ambientales y sociales, estas son irrigadas por inundación o utilizando cisternas con uniformidades y eficiencias de riego bajas. El riego de las áreas verdes urbanas es esencial para la fotosíntesis y crecimiento del césped (Straw et al. 2018). Sin embargo, la uniformidad de distribución del riego puede ser influenciado por las deficiencias del sistema como: el mal funcionamiento de los aspersores, las fluctuaciones en la presión y el diseño inapropiado; o factores externos como el viento e interferencias como árboles y arbustos (Irrigation Association USA 2013, Tamagi et al. 2018).

La Irrigation Association USA (2013) sugiere que la uniformidad de distribución del riego (DUIq) de rotores debe estar en el rango de 65% a 75%. La auditoría tradicional en base a colectores de agua (VAC), son útiles para visualizar e identificar, y posteriormente el usuario corrige las deficiencias de distribución de agua de un sistema de riego (Straw et al. 2018). Sin embargo, el método de la DUIq basado en el VAC solo proporciona información de distribución de agua de un sistema de riego, pero no indica la infiltración y redistribución de agua en el suelo, debido a que los volúmenes de agua recolectados en los colectores son típicamente medidos sobre el follaje de la planta (Dukes et al. 2006).

Por otro lado, el manejo del césped y suelo pueden estar influenciados por otros factores como la compactación, contenido de agua en el suelo y los índices de vegetación. La compactación del suelo causa la disminución en el crecimiento, calidad y persistencia en el césped debido a impactar negativamente con la aireación del suelo, resistencia del suelo o las relaciones entre planta y humedad de suelo.

Entre las propiedades más relevantes para evaluar en las pruebas de rendimiento de áreas verdes son: la uniformidad de distribución del riego en base a colectores y en base el contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), la resistencia a la penetración (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), estas son variables esenciales para el manejo de césped.

Las Unidades Específicas de Manejo o “Site-Specific Management Units” (SSMUs) describen las propiedades del suelo, la planta y los requerimientos de riego; y son fundamentales para el manejo eficiente en la agricultura de precisión (AP); este último concepto es también aplicado al manejo de las áreas verdes urbanas o también llamado “Precision Turfgrass Management” (PTM) para mejorar las prácticas de riego (Carrow et al. 2010, Lulli y De Bertoldi 2016) y mitigar la variabilidad dentro del campo deportivo (Straw et al., 2018c). Las SSMUs han sido propuestas con la finalidad de conocer la variabilidad espacial de los factores: edáfico, antropogénico, topográfico, climático y biológico, a través de un mapa de unidades georreferenciadas (Corwin y Lesch 2010), el cual permite el manejo óptimo del recurso (González et al. 2015).

La variación espacio temporal del suelo, clima, planta y los requerimientos de riego son desafíos para la gestión de los espacios cubiertos con césped (Carrow et al. 2010). Existen investigaciones donde evaluaron las variables como humedad de suelo (θ_v), compactación o resistencia a la penetración del suelo (RP), NDVI de césped y distribución de uniformidad de riego mediante colectores y humedad de suelo en campos de golf y deporte (Krum et al. 2010, Carrow et al. 2010, Straw et al. 2018, Carrow y Cline 2011, Straw et al. 2018, 2016). En la investigación de Straw y Henry (2018) evaluaron la variación espacio temporal de la θ_v , RP y NDVI de césped y determinaron los coeficientes de correlación entre las variables.

El uso eficiente de los recursos como el agua, energía, mano de obra e insumos en la gestión de las áreas verdes urbanas conduce a integrar varios atributos del suelo y la planta para las auditorías. Tecnologías recientes permiten el uso de sensores portátiles para el manejo de áreas específicas en césped o también llamado “Precision Turfgrass Management” (PTM) para el uso eficiente y conservación del agua (Carrow et al. 2010, Straw et al. 2016, Straw y Henry 2018).

En la presente investigación el objetivo principal fue determinar la variación espacio temporal del contenido volumétrico de agua en el suelo, resistencia a la penetración del suelo, calidad de césped y volúmenes de agua de riego que influyen en el uso eficiente del agua. Los objetivos específicos fueron: a) Comparar la uniformidad de distribución de riego por aspersión en base al volumen de agua en colectores y contenido volumétrico de agua en el suelo en dos espacios de diferentes condiciones de uso, b) Realizar mapas espacio temporales del contenido volumétrico de agua en el suelo, resistencia a la penetración del suelo e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada del césped y c) Calcular los coeficientes de correlación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo, resistencia a la penetración del suelo e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada del césped.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Césped

2.1.1. Beneficios

El césped ha sido utilizado por los humanos para mejorar el medio ambiente por más de 10 siglos. Los beneficios del césped se pueden dividir en componentes funcionales, recreativos y estéticos. Entre los principales beneficios funcionales son control de erosión del suelo, disipación de calor y conversión de CO₂ (Beard y Green 1994). El césped, como todas las plantas, captura el dióxido de carbono atmosférico (CO₂) y usa el CO₂ a través del proceso de fotosíntesis para crear energía en forma de azúcar y carbohidratos. Con el incremento de los niveles de CO₂ atmosférico asociado con el efecto invernadero (calentamiento global); el césped sirve como fuente de almacenamiento de carbono. La transpiración del césped ayuda a reducir la temperatura en el ambiente urbano, disipando los altos niveles de radiación (Sherratt 2011), ver Tabla 1.

Tabla 1. Temperatura promedio en °C según el tipo de superficie.

Tipo de superficie	Temperatura promedio de la superficie °C
Césped sintético	47.2
Asfalto	42.7
Suelo desnudo	36.7
Concreto	34.4
Césped	25.6

Fuente: Willians, C.F y Pulley, G.E (2002)

Los beneficios recreativos del césped contribuyen a la calidad de vida de cada individuo. Las áreas verdes y otros espacios recreacionales son lugares donde los adultos, niños y mascotas pasan el tiempo fuera de casa para realizar actividades como jugar, relajarse y entretenerse (Sherratt 2011).

Los beneficios estéticos incluyen belleza y atracción por los espacios verdes; el césped es un complemento al ecosistema paisajístico de flores, arbustos y árboles; mejora la salud mental con un impacto terapéutico positivo, armonía social y estabilidad; productividad laboral; y una mejor calidad de vida en general, especialmente en las áreas urbanas densamente pobladas (Beard y Green 1994).

2.2. Mantenimiento de césped en campos deportivos y áreas de recreación

2.2.1. Corte de césped

El corte de césped es importante para el mantenimiento porque mantiene el crecimiento uniforme de las hojas, además fomenta el crecimiento denso, la calidad en la presentación y evita el crecimiento de las malezas

El corte a una altura correcta y la frecuencia son importantes para mantener el césped sano. Cada especie de césped tiene un rango de tolerancia, ver Tabla 2 alturas recomendadas para corte del césped. Cortar el césped debajo de las alturas requeridas puede causar estrés a la planta, menor densidad e invasión de malezas (SportsTurf 2012).

La frecuencia de corte del césped depende del crecimiento y la especie, el nivel de mantenimiento, las condiciones climáticas y el estándar requerido. La regla estándar en la industria para el césped de manutención moderada a intensiva es que el corte de césped no debe sobrepasar más de 1/3" (máximo 5 mm) de la hoja en un solo recorte (SportsTurf 2012). La frecuencia de corte de césped una o dos veces por semana es aceptable para algunos campos deportivos que son cortados a la altura de 2.0 a 2.5 pulgadas. La frecuencia de corte de tres veces por semana puede ser necesario durante periodos de rápido crecimiento (The New Jersey Turfgrass Association 2014)

Las condiciones climáticas influyen en el crecimiento del césped. La dirección en la que se cortan el césped promueve el crecimiento vertical del césped y puede reducir el desgaste que el equipo les da cuando este pasa por un mismo patrón (SportsTurf 2012).

Tabla 2. Tolerancia de alturas mínimas y máximas para el corte de césped

Céspedes de Climas Fríos	
Tipos de Céspedes	Tolerancia de alturas mínimas a máximas
Pasto Azul de Kentucky (<i>Poa pratensis</i>)	38 mm - 76 mm
Raigrás Perenne (<i>Lolium perenne</i>)	13 mm - 38 mm
Festuca Alta (<i>Festuca arundinacea</i>)	38 mm - 76 mm
Agrostide Común (<i>Agrostis palustris</i>, A. stolonifera)	3 mm - 6 mm

Céspedes de Climas Cálidos	
Tipos de Céspedes	Tolerancia de alturas mínimas a máximas
Gramilla, Bermuda (<i>Cynodon dactylon</i>)	13 mm - 51 mm
Zoisa (<i>Zoysia japonica</i>)	13 mm - 38 mm

Fuente: SportsTurf (2012)

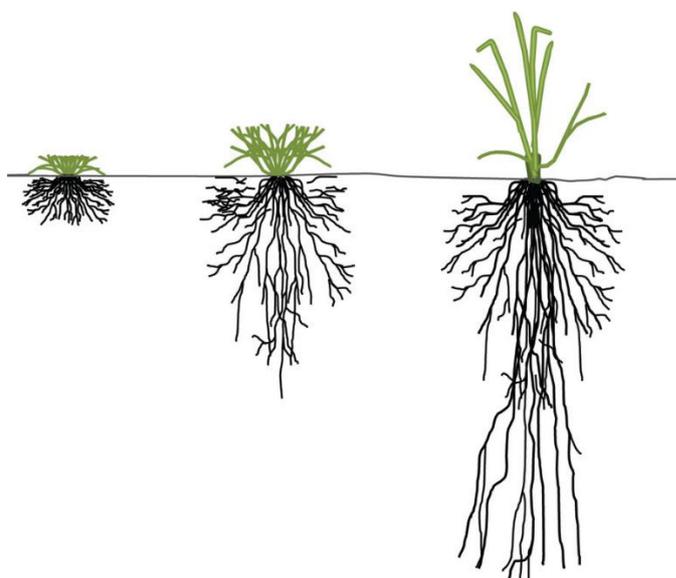


Figura 1: Efecto del corte de césped en el desarrollo de altura de raíces.

Fuente: SportsTurf (2012)

2.2.2. Riego por aspersión

La textura de suelo y el grado de compactación controla la cantidad de agua que puede ser infiltrada y almacenada en el suelo, afectando la cantidad y velocidad aplicado del agua a través del riego (The New Jersey Turfgrass Association 2014). Por ejemplo, el crecimiento de césped en suelos arenosos necesitan un riego más frecuente que el crecimiento de césped en suelos francos o arcillosos, porque el suelo arenoso reduce la retención de agua en el suelo y requiere riegos más continuos para disminuir el stress de la planta (The New Jersey Turfgrass Association 2014, SportsTurf 2012).

El exceso de riego ocasiona pérdidas de agua por evaporación, escorrentía y lixiviación. Esto puede incrementar el número de malezas que invadirán el campo de césped (The New Jersey Turfgrass Association 2014).

El uso de sensores de humedad de suelo es útil para evaluar las necesidades de riego en la profundidad de raíces que necesita la planta. La ubicación de colectores para recolectar agua durante los riegos es necesario para calcular la velocidad de aplicación del sistema de riego en un tiempo determinado. Esta información es importante para determinar el tiempo de riego. Bajo temperaturas moderadas, el césped deportivo necesitara aproximadamente una pulgada de agua por semana para mantener el crecimiento del césped. El sensor de humedad de suelo sirve para confirmar que el agua se haya distribuido adecuadamente en toda la zona de raíces después de riego (The New Jersey Turfgrass Association 2014).

Los emisores de riego por aspersión en áreas verdes y campos deportivos son rotores y cañones.

a. Rotores

El Rotor de la serie 5000 de la marca RainBird, es un tipo de aspensor emergente usado para el riego de jardines. Las especificaciones del emisor se presentan a continuación:

- Alcance: de 7,6 a 15,2 m
- Presión: de 1,7 a 4,5 bar
- Caudales: de 0,17 a 2,19 m³/h



Figura 2: Chorro de agua de rotor serie 5000

Fuente: Manual de RainBird (2014)

b. Cañones

Este tipo de aspersor emergente es comúnmente usado para el riego perimetral de campos deportivos, cuenta con 2 boquillas de riego. Las especificaciones del emisor se presentan a continuación:

- Alcance: de 30,0 a 60,0m
- Presión: de 3 a 8 bar
- Caudales: de 21 000 a 75 000 l/hr



Figura 3: Cañón emergente VYR

Fuente: Manual de VYR (2016)

2.2.3. Aireación

Aireación es una de las prácticas culturales necesarias para la manutención de campos de césped con alto transito especialmente cuando el suelo es susceptible a la compactación. Los beneficios de airear la tierra incluyen el aumento del movimiento de agua, aire y nutrientes en el área de enraizamiento, corrige y alivia la compactación de la tierra y reduce la acumulación de fieltro o “thatch”. En la Tabla 3 se presenta los diversos tipos de aireación de suelo (SportsTurf 2012).

Tabla 3. Tipos de aireación de suelo en campos de futbol

Tipo de Aireación	Descripción
Escarificador de Sacabocados	<p>Saca tierra por sacabocados (9mm-18mm de diámetro) a una profundidad de 50-150mm. Estos centros pueden retirarse o reintegrarse dentro del enraizamiento usando un dragmat.</p> <p>Este método debe hacerse por lo menos dos veces al año y de 4 a 6 veces al año en áreas con mayor tránsito.</p>
Escarificador de Púas Sólidas	<p>Esta máquina atraviesa el enraizamiento sin mayor disturbio a la superficie.</p> <p>Es una herramienta ideal para áreas de uso intensivo, pero no reemplaza los beneficios que da la aireación por sacabocado.</p>
Escalozador Desmenuzante	<p>Este método penetra el suelo y fractura la compactación debajo del suelo a una profundidad de hasta 152 mm.</p> <p>La estabilidad de los suelos no es afectada y no hay mayor disturbio en la superficie; pero no substituye los beneficios de la aireación por sacabocado.</p>
Escalozador por Chorro a Agua con Presión	<p>Chorros de agua con presión penetran el fieltro y aflojan el substrato.</p> <p>Esta es una manera efectiva de airear el césped localizado en áreas con climas desfavorables. Efectivo en campos a base de arena.</p> <p>No hay mayor disturbio en la superficie; pero no substituye los beneficios de la aireación por sacabocado.</p>
Tajadas	<p>Cuchillos en forma de V montados en discos unidos a un eje metálico que rota suavemente al mismo tiempo que va cortando el césped.</p> <p>Son muy efectivos en áreas de temperaturas extremas, pero no substituye los beneficios de la aireación por sacabocado.</p>

Segadora Vertical	<p>Las cuchillas que cortan los céspedes están unidas a un eje horizontal de movimiento rápido.</p> <p>Dependiendo de la altura, estas pueden usarse para liberar fibras, remover fieltro o airear; no substituye los beneficios de la aireación por sacabocado.</p>
Segadora con Puntas	<p>Parecida a la segadora vertical. La diferencia es que las cuchillas son puntiagudas, no planas. Estas cuchillas están unidas a un eje horizontal de rotación lenta.</p>
Púas Profundas	<p>Las púas penetran el suelo a una profundidad de 150-450 mm.</p> <p>Miden hasta 38 mm de diámetro.</p> <p>Si se utilizan púas huecas, estas pueden rellenarse con enmiendas.</p> <p>Las púas solidas son ventajosas al usarla en suelos compactos de arcilla o suelos cascajosos.</p> <p>Mínima perturbación a la superficie.</p> <p>Utilizar aireación perturba la superficie significativamente.</p> <p>El resultado es un esfuerzo concentrado para mantener los hoyos y topdress con tierra nueva o enmiendas.</p>
Perforadora Profunda/Perforadora y Relenadora	<p>Las perforadoras penetran el suelo a una profundidad de 150-450 mm.</p> <p>Existen accesorios que inyectan arena o enmiendas inmediatamente después de haber hecho los hoyos.</p>

Fuente: SportsTurf (2012)

2.2.4. Dethatching o control de espesor de fieltro

El espesor de fieltro o “thatch” es la acumulación de materia orgánica en descomposición o parcialmente en descomposición que es encontrada en la superficie del suelo debajo del césped. La capa de “thach” es aceptable cuando es menor a ¾”. Sin embargo, los niveles superiores a ¾” pueden causar raíces poco profundas y afectar negativamente la salud del césped. La excesiva capa de “thatch” puede dificultar que el riego, la fertilización y el uso de pesticidas lleguen al suelo (Cornell University s. f.).

La aireación es una práctica de mantenimiento preventivo importante para el control de “thatch”. La aireación regular alivia la compactación y mejora el movimiento del aire en el suelo, lo que aumenta la actividad microbiana y la descomposición del “thatch” (The Pennsylvania State University s. f.).

2.3. Césped para campos deportivos

Los campos deportivos de césped natural son altamente variables por que dependen de factores como la especie de césped, textura de suelo, drenaje, uso y manejo (Straw 2017).

Los campos deportivos de césped natural tienen principalmente dos componentes: césped y suelo (James 2011, Puhalla et al. 1999). Los céspedes más comunes para campos deportivos son bermuda (*Cynodon dactylon*), pasto azul de kentucky (*Poa pratensis* L.), y raigrás perenne (*Lolium perenne* L.), pero seashore paspalum (*Paspalum vaginatum* L.) y festuca alta (*Festuca arundinacea*.) son también usados en algunos escenarios (Puhalla et al. 1999). Cada uno proporciona ciertas cualidades, como fuertes rizomas intermedios (bermuda, pasto azul de kentucky, seashore paspalum), crecimiento vegetativo robusto (todos excepto seashore paspalum), y moderada a excelente resistencia al desgaste (todos excepto seashore paspalum) que mantienen los campos deportivos exitosos (Puhalla et al. 1999).

El clima es el principal factor para seleccionar cuál de las especies de césped usar en un campo deportivo (Turgeon 2011). Los céspedes se dividen en dos tipos: césped de estación caliente (C₄) y césped de estación fría (C₃) dependen de su ciclo fotosintético (Wherley y Sinclair 2009). Bermuda y seashore paspalum son césped de estación caliente que son encontrados típicamente en campos deportivos con climas cálidos, mientras pasto azul de kentucky, y raigrás perenne, y festuca alta son césped de estación fría y son encontrados típicamente en campos deportivos con climas fríos (a pesar que festuca alta no tiene un buen desempeño en climas extremadamente fríos (Christians 2011). Es muy común sembrar bermuda y raigrás en climas donde el césped bermuda permanece en dormancia en estaciones frías (Turgeon 2011).

El suelo es un sistema dinámico con propiedades físicas, químicas y biológicas que presentan una gran variabilidad espacial, de tal forma que se ha hecho necesario el uso de metodologías novedosas que permitan estudiar dicha variabilidad (Pinzón et al. 2016). El suelo proporciona el medio para el crecimiento del césped, la textura (proporción de arena, arcillo

y limo) efectos de suelo químico (capacidad de intercambio de cationes y pH) propiedades, manejo de campo, seguridad y jugabilidad en el campo en general (Puhalla et al. 1999, James 2011). Texturas finas de suelo (arcilla) tiene una mayor capacidad de retención de agua, son más susceptibles a la compactación de suelo y por lo general tienen una mayor resistencia (mayor resistencia para el desplazamiento) que la textura de suelo gruesas (arena) (James 2011). Esto se debe al tamaño de partículas de arcilla más pequeñas (< 0.002 mm) en comparación con las partículas de arena más grande (2-0.05 mm), en un suelo compactado se encuentra menos macroporos y más microporos que restringe el movimiento de agua y aire (Marshall et al. 1996). Campos deportivos con alto contenido de arcilla usualmente requieren menos agua y fertilización, pero pueden ser susceptibles a la dureza de la superficie de suelo bajo condiciones bajas de humedad de suelo o al encharcamiento debido a la escasa infiltración de agua después de la lluvia. A lo contrario, campos deportivos de arena generalmente requieren más agua y fertilización, pero son menos propensos a la compactación de suelo o agua estancada en la superficie después de la lluvia (Guisasola et al. 2009).

Los campos deportivos son más difíciles de manejar entre todas las áreas verdes con césped. Estos espacios generalmente reciben tráfico intenso (pisoteos propios de los deportes, conciertos, y otros eventos) y pueden sufrir daños de manera regular (Christians 2011). Todos los escenarios de suelo pueden tener un impacto significativo en el sistema de césped si es manejado inadecuadamente (Puhalla et al. 1999).

2.4. Pruebas de rendimiento en campos deportivos de césped natural

Pruebas de rendimiento en campos deportivos de césped natural requieren muestreo para obtener información de la superficie de suelo como las siguientes propiedades: la humedad de suelo, compactación de suelo, dureza de la superficie de suelo y calidad de césped (Carrow et al. 2010, Straw 2017, Straw et al. 2016).

Se puede lograr un enfoque más detallado de las pruebas de rendimiento con el análisis espacial y la creación de mapas de superficie para detectar la variabilidad de una propiedad determinada en el campo. El análisis espacial se ha utilizado ampliamente en la agricultura para implementar agricultura de precisión (Taylor et al. 2003).

Algunos estudios han considerado clasificaciones subjetivas (ejemplo bueno, satisfactorio o pobre) para evaluar los campos deportivos de césped (Meyers 2010), este método no es confiable porque la mayoría de estos estudios no reportan las definiciones específicas de las clasificaciones subjetivas (Petross y Twomey 2013). “Pruebas de rendimiento” es un término usado en la industria de deportes en césped donde las calificaciones de las características del campo son in situ y se usan mediciones objetivas (Straw y Henry 2018, Carrow et al. 2010). Se han venido utilizando varios equipos de medición, estrategias de muestreo y análisis de datos para que objetivamente se pueda evaluar los campos deportivos de césped natural.

2.4.1. Resistencia a la penetración o compactación

Entre los equipos de medición, el penetrómetro es un medidor de compactación de suelo, existen diferentes tamaños de penetrómetros la mayoría de cada uno de ellos son manuales y tienen un cono cilíndrico en el final del eje, la penetración en la superficie del suelo se realiza bajando un peso desde una altura estándar al eje (medir la profundidad de penetración del suelo) o empujando manualmente (con una celda de carga incorporada para medir la fuerza de penetración a cierta profundidad del suelo) (Straw et al. 2016, Orchard et al. 2005, Orchard 2001, Takemura et al. 2007). El medidor de compactación de suelo (SC) serie 900, es un penetrómetro cónico para estudiar la densidad del suelo, su traficabilidad y compactación. Mide y registra en forma digital, los valores obtenidos con el equipo se pueden visualizar en PSI o KPa (Spectrum Technologies s. f.).

Los penetrómetros de cono se han utilizado en los estudios de Takemura et al (2007) quien evaluó la dureza de penetración de las canchas de rugby en Nueva Zelanda (hasta una profundidad de 50 mm), y Holmes y Bell (1986) que evaluaron las canchas de fútbol a una profundidad de 20 mm (Caple 2011). En la investigación de Straw et al (2016) se reportó el uso del sensor SC 900 para evaluar la resistencia a la penetración del suelo en cuatro campos deportivos, las mediciones se realizaron a 100 mm de profundidad.



Figura 4: Sensor de compactación del suelo SC 900

La compactación de suelo es un factor importante en la degradación de suelos, este es manifestado como la reducción en el volumen de suelo y el incremento de la densidad aparente, reducción de densidad aparente del suelo (Barik et al. 2014). Las variables que afectan el Índice de Cono (IC) son la densidad aparente, textura de suelo, porosidad total y humedad gravimétrica de suelo (Cassel 1983).

La determinación de la resistencia a la penetración es recientemente el más usado para evaluar el estado de la compactación de suelo y la dificultad mecánica para el crecimiento de las raíces de la planta en el suelo (González et al. 2015). Usualmente, restricciones para el crecimiento de raíces son correlacionadas con la resistencia de penetración en el suelo en valores sobre 2-3 MPa (De Morales et al. 2014). De acuerdo a The United States Department of Agriculture (USDA) el grado alto de la resistencia a la penetración es de 2.0 a 4.0 MPa, ver tabla 4.

Tabla 4. Rangos de resistencia a la penetración

Clases	Resistencia a la penetración (MPa)
Pequeño	<0.10
Extremadamente bajo	<0.01
Muy bajo	0.01 – 0.10
Intermedio	0.10 – 2.00
Bajo	0.10 – 1.00
Moderado	1.00 – 2.00
Grande	>2.00
Alto	2.00 – 4.00
Muy alto	4.00 – 8.00
Extremadamente alto	>8.00

Fuente: USDA (1993)

2.4.2. Contenido volumétrico de agua del suelo

El método más común de cuantificar la humedad de suelo en césped es con el sensor Time Domain Reflectometry (TDR) o sensor de capacitancia (Carrow et al. 2010, Straw y Henry 2018, Straw et al. 2016). Ambos sensores miden los cambios de la constante dieléctrica (ϵ) en el suelo como las fluctuaciones de agua y reportan la humedad de suelo como el contenido de humedad volumétrica en porcentaje (Leib et al. 2003). El sensor Time Domain Reflectometry transmite y refleja un pulso de voltaje de alta frecuencia a lo largo de las dos sondas de metal una vez insertado en el suelo. La permitividad y la velocidad del pulso están estrechamente relacionados con el contenido de agua en el suelo, ya que el agua tiene un (ϵ) mucho mayor que el aire ($\epsilon = 80$ para el agua y 1 para el aire) (Plauborg et al. 2005). El sensor TDR serie 350 te da la flexibilidad para medir el contenido de humedad de suelo directamente, en cualquier lugar en el campo. Con el registrador de datos interno conectado a un receptor GPS suministrado por el usuario, el TDR 350 captura datos georreferenciados que se pueden importarse fácilmente en el software para el análisis completo a través de internet (Spectrum Technologies s. f.).

En la investigación de Straw et al (2016) se reportó el uso del sensor TDR serie 300 para recolectar manualmente la información de contenido de humedad volumétrica de cuatro campos deportivos, uso las varillas de 7.6 cm para el muestreo de datos.

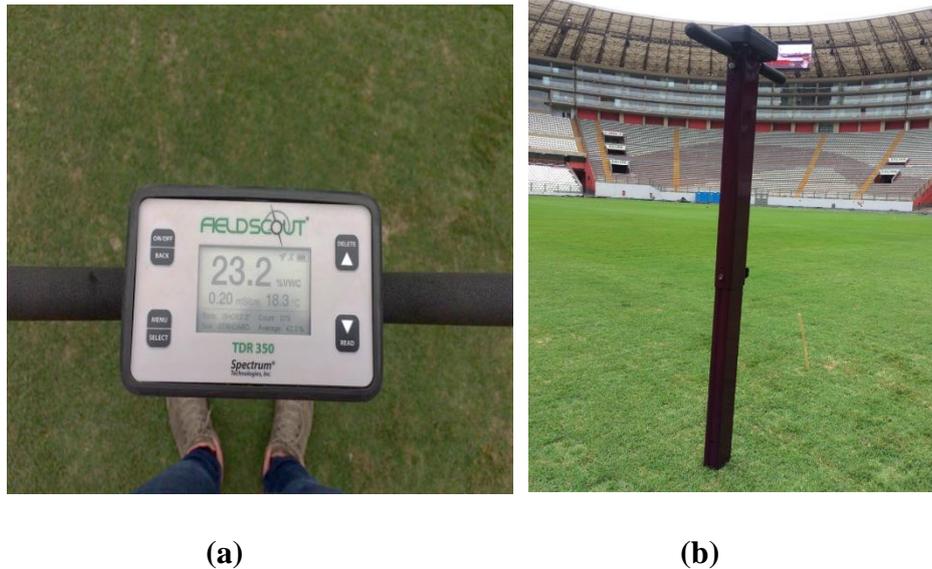


Figura 5: (a) Pantalla de medición del TDR 350 y sensor de humedad de suelo TDR

2.4.3. El índice de vegetación de diferencia normalizada

Calidad de césped (color , cobertura y densidad) han sido visualmente evaluados en investigaciones de césped (Morris y Shearman 1998, McNitt y Landschoot 2003). Hagggar et al. (1983) introdujo la técnica de reflectancia para cuantificar y diferenciar los canopies verdes del suelo. Este método ha sido utilizado en varias investigaciones de césped en campos deportivos, especialmente en el Reino unido (Gibbs y Baker 1989, McClements y Baker 1951). El sensor mide la reflectancia del espectro rojo (R) y el infrarojo (IR) para determinar una relación de radiancia ($R + IR / IR$) donde a mayor valor de canopy verde mayor es la relación (Hagggar et al. 1983) .

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) utiliza una diferente relación de la reflectancia roja (R) y el infrarojo cercano (NIR) para calcular el índice de vegetación $[(R - NIR)/(R + NIR)]$. Las plantas sanas son caracterizadas por un mayor valor de infrarojo cercano (NIR) y un menor valor de reflectancia roja (R), lo contrario se observa en las plantas en condiciones bajo estrés, ver Fig. 6 (Krum et al. 2010). Los sensores manuales de NDVI se están usando más en investigaciones de césped en las últimas dos décadas para cuantificar la calidad y densidad de césped (Bremer et al. 2011). El medidor de color de césped Field Scout TCM 500 NDVI (Figura 7) mide la luz reflejada del césped en las bandas espectrales rojas (660 nm) e infrarrojo cercano (850nm). Las unidades de medición del NDVI es desde 0 a 1.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR: Reflectancia en la banda 850 +/- 5mm

Red: Reflectancia en la banda 660 +/-5mm

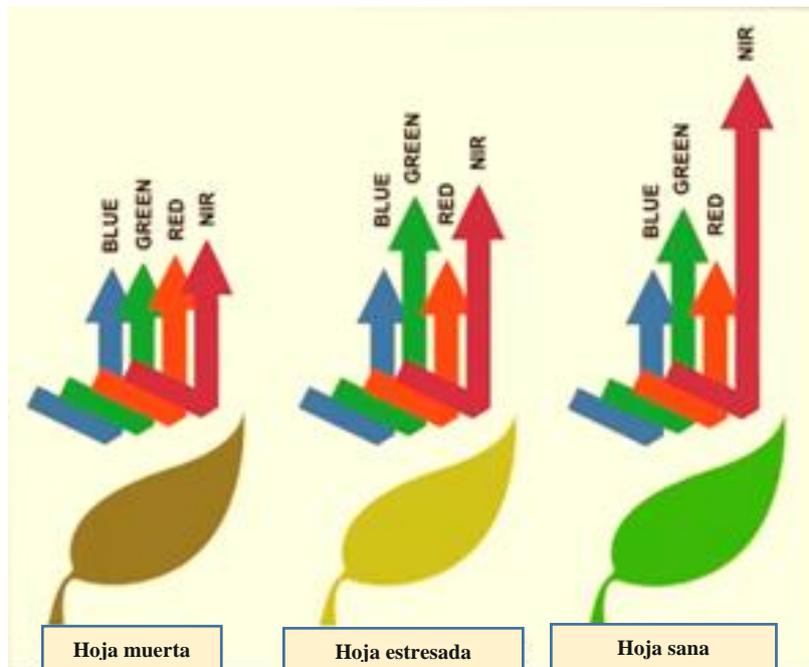


Figura 6: Calidad de hoja según el nivel de reflectancia

Fuente: Henry Sommer (2017)



Figura 7: Prueba de medidor de calidad de césped TCM 500 NDVI

2.5. Auditorias de riego tradicional

La auditoría de riego tradicional implica recolección de información, como los mapas del sistema de riego, el consumo de agua de riego, los programas de riego y el coeficiente de distribución de uniformidad de riego. La inspección del sistema de riego es el punto de partida para identificar las falencias de los equipos. Las pruebas de campo son realizadas para determinar la uniformidad de distribución de agua del sistema y calcular la velocidad de aplicación en las zonas evaluadas (Irrigation Association USA 2013).

La auditoría de riego tiene dos fases: La primera fase es la recolección de información existente que pueda influenciar en el riego y en la inspección del sistema de riego para la reparación o corrección de los equipos que estén operando inadecuadamente. Durante esta fase la Asociación de riego de los Estados Americanos de Norte América recomienda la inspección de lo siguiente (Carrow y Cline 2011):

- El funcionamiento de la electroválvula
- El funcionamiento de los aspersores
- Revisión de las boquillas de riego
- Roturas de tuberías
- Fugas de aspersores

La segunda fase de una auditoria tradicional es evaluar la uniformidad de riego del sistema, donde los colectores de agua son ubicados según la grilla propuesta en la zona de evaluación, el sistema es operado en condiciones de vientos bajo y finalmente se calcula la uniformidad de distribución de agua. Luego de analizar los resultados se toma mayor interés a los problemas de diseño como (Carrow y Cline 2011):

- Inadecuados espaciamientos entre aspersores
- Inadecuada programación de riego
- Inadecuados diámetros de tuberías
- Inadecuada presión y caudal para la operación del sistema
- Equipos desgastados u obsoletos

2.5.1. Uniformidad de distribución de riego (UD)

La uniformidad de distribución de agua en los sistemas de riego por aspersión en césped es fundamental para la buena calidad de la planta, las condiciones homogéneas del campo, el uso eficiente y la conservación del agua (Burt et al. 1997, Vis et al. 2007). Sin embargo la distribución del riego puede ser influenciado por las deficiencias del sistema como: el mal funcionamiento de los aspersores, las fluctuaciones en la presión y el diseño inapropiado ; o factores externos como el viento e interferencias como árboles y arbustos (Burt et al. 1997, Irrigation Association 2013 ,The European Irrigation Association 2013)

La uniformidad de distribución del cuarto inferior (DU_{lq}) es el indicador más utilizado para evaluar el rendimiento del sistema de riego para césped. La cuantificación de DU_{lq} generalmente se realiza ubicando los colectores para la captura del agua regada sobre el césped, el número de colectores está en función al tamaño del área o número de emisores de riego instalados , a mayor número de colectores se obtendrá un valor confiable (Mecham 2004). Se enciende el sistema de riego por aspersión en un tiempo determinado y luego se mide la cantidad de agua almacenada en cada colector (Merriam y Keller 1978)

El cuarto inferior de la uniformidad de distribución de riego (DU_{lq}) puede ser calculado con la siguiente ecuación (Merriam y Keller 1978):

$$DU_{lq} = \frac{V_{25\%}}{V_{100\%}}$$

Donde: $V_{25\%}$ =promedio del cuarto inferior de un grupo de mediciones de colectores y $V_{100\%}$ =promedio total de un grupo de mediciones de colectores.

En la Tabla 5, se presenta la clasificación del DU con rangos (excelente, muy bueno, bueno, justo y pobre) para los tipos de emisores (difusores, rotores y aspersores de impacto)

Tabla 5. Clasificación de la uniformidad de distribución del cuarto inferior para áreas verdes urbanas con sistema de riego por aspersión.

Tipo de emisor	Excelente (%)	Muy bueno (%)	Bueno (%)	Justo (%)	Pobre (%)
Difusores	75	65	55	50	40
Rotores	80	70	65	60	50

Fuente: Mecham (2004)

Tabla 6. Clasificación de la uniformidad de distribución del cuarto inferior para áreas verdes urbanas con sistema de riego por aspersión.

Tipo de emisor	Posible (%)	Objetivo (%)	Histórico (%)
Rotores	75 - 85	65 - 75	55 - 65
Difusores	65 - 75	55 - 65	45 - 55

Fuente: Irrigation Association USA (2013)

Los rotores tienen mayor uniformidad de distribución que los difusores, además el adecuado espaciamiento entre aspersores y correcto diseño son importantes para obtener altos valores de uniformidad de distribución (Baum et al. 2005).

La programación de riego está basada en la eficiencia de riego el cual es determinado por el manejo eficiente y la uniformidad de distribución. La DU_{Iq} es usado para ajustar la programación de riego a través del reajuste de programación o también llamado Scheduling multiplier (SM), donde el SM es un valor adimensional y su aplicación es compensar o ajustar razonablemente el número de minutos para la programación de riego en el controlador esto es debido a la falta de uniformidad causada por el aspersor y el diseño instalado (Krum et al. 2010, Irrigation Association USA 2013):

$$SM = \frac{1}{(0.4 + (0.6 \times DU_{Iq}))}$$

Donde:

SM : Scheduling multiplier

DU_{Iq} : Uniformidad de distribución del cuarto inferior

a. Velocidad de viento

La velocidad de viento es un parámetro importante que afecta la eficiencia de aplicación de agua en sistemas de riego por aspersión, los altos valores de velocidad de viento tienen un efecto negativo en el patrón de distribución de agua de los aspersores (Demirel y Sener 2009).

La medición de la velocidad de viento es parte de una auditoria de riego y se recomienda que las condiciones de viento deberían ser cercanas como posible a las condiciones típicas de operación. Si el sistema comúnmente opera en las noches cuando no existe viento, las pruebas de colectores durante el día resultarían muy bajo y sería una estimación errónea de

la uniformidad de distribución. Esto sería una pérdida de tiempo y dinero (Association The European Irrigation 2013).

El anemómetro es un equipo que mide la velocidad de viento sostenido este directamente en contacto con el viento. Para asegurar una prueba precisa de auditoria de campo, la velocidad de viento debería ser menor que 13 km/hr (5.8 m/s). Según los estándares de la American Society of Agricultural Engineers (ASAE 2000) la norma acepta velocidades de viento de hasta 5m/s en sistemas de riego por aspersión (Baum et al. 2005). Existen dos factores a tomar nota acerca del anemómetro. El primero es que el equipo mide velocidad de viento, y no tiene en cuenta pequeños cambios en dirección de viento. Esto conduce al segundo factor, que la velocidad de viento no es constante con el tiempo y durante toda la prueba en el lugar. A fin de compensar esto, se deberán medir varias lecturas y la lectura que parece ser la más representativa del lugar deberá ser usada (Association The European Irrigation 2013).

b. Presión

Existen dos razones para revisar la presión del sistema. Primero, estar seguros que la presión de la prueba sea la misma a la presión típica de trabajo durante un riego regular. La segunda, es revisar la presión del sistema para ver la variación de la presión dentro del sistema (Association The European Irrigation 2013).

En la Fig. 8, se observa la relación que existe entre la presión de trabajo del aspersor (alto, bajo y correcto) y el alcance y distribución de agua

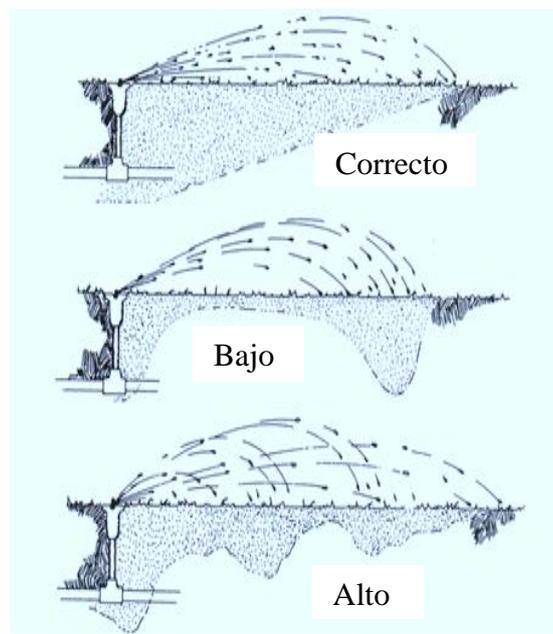


Figura 8: Efecto de la presión correcto, bajo y alto en el funcionamiento del aspersor.

Fuente: Asociación Europea de Riego (2013)

c. Velocidad de aplicación

Es la velocidad en la cual el agua de riego es aplicada por unidad de tiempo. La precipitación horaria es usualmente medida en milímetros de agua por hora (mm/hr) este es calculado como un promedio dentro del área. Dependiendo de la presión, espaciamiento y tipo de emisor seleccionado, cada estación podría tener una diferente velocidad de aplicación (Association The European Irrigation 2013).

2.6. Uniformidad de distribución de riego en base al volumen de agua en colectores y contenido volumétrico de agua en el suelo

El método de DUlq basado en colectores proporciona información de distribución de agua de un sistema de riego, pero no indica la infiltración y distribución de agua en el suelo porque los volúmenes de agua medido en colectores son típicamente medidos por la uniformidad de aplicación sobre el follaje. La metodología de cálculo de uniformidad de distribución en base los valores de contenido de humedad volumétrica de agua del suelo (θ_v) se han utilizado en diversas investigaciones (Kieffer y Huck 2008, Dukes et al. 2006, Kieffer y Connor 2007, Carrow y Cline 2011, Straw et al. 2018), para calcular el DUlq en lugar de capturar valores de los colectores. Los equipos que miden humedad de suelo cada vez están más disponibles para los administradores de campos de césped, (Dukes et al. 2006, Kieffer y Connor 2007, Krum et al. 2010)

La DUlq basado en humedad de suelo es determinada usando la misma ubicación de los colectores y la misma ecuación de DUlq. Los dos valores de DUlq se comparan para determinar si la uniformidad de agua en el suelo es un indicativo de uniformidad de agua aplicado (Kieffer y Connor 2007, Dukes et al. 2006, Kieffer y Huck 2008, Straw et al. 2018)

Las comparaciones de DUlq basado en humedad de suelo y DUlq basado en colectores han sido realizadas en parcelas de investigación de césped, áreas residenciales, campos deportivos y campos de golf donde reportaron que DUlq basado en humedad de suelo fue más alto que DUlq basado en colectores lo que indica diferencias entre DUs (Kieffer y Huck 2008, Dukes et al. 2006, Kieffer y Connor 2007, Carrow y Cline 2011, Straw et al. 2018). Las diferencias se atribuyeron a la acumulación de thatch, textura de suelo, pendiente. Factores adicionales pueden influenciar la infiltración de agua en campos deportivos. En

particular, la nivelación, compactación, tráfico peatonal, céspedes dañados después del juego (Madison 1971, Puhalla et al. 1999).

DUIq basado en humedad de suelo medida con el sensor TDR a 12 cm de profundidad resulto ser 26% a 35% más alta que DUIq basado en colectores (Mecham et al. 2001). En otra investigación se concluyó que la DUIq basado en humedad de suelo resulto ser más alto que el DUIq basado en colectores en suelos de textura franco arenoso de campos de futbol; y el DUIq basado en humedad de suelo resulto ser muy similar al DUIq basado en colectores en suelos construidos con capa de arena (Straw et al. 2018).

Tecnologías recientes que integran la información de la distribución espacial del riego con la información de la distribución espacial de la planta y propiedades de suelo pueden proporcionar una evaluación más robusta del funcionamiento del sistema de riego que los métodos convencionales. Los mapas del contenido volumétrico de agua en el suelo serian útiles para el manejo de áreas específicas de césped mediante el uso de sensores o también llamado Precision Turfgrass Management (PTM) como conocer los puntos donde se debe airear el suelo y conocer donde debemos ubicar el sensor de humedad. Mientras que los colectores de agua son útiles para visualizar, identificar y después corregir las deficiencias de distribución de agua de un sistema de riego (Straw et al. 2018).

La nueva auditoría basada en humedad de suelo ha sido formulada como un sistema de soporte - decisión, que agrega valor a los datos combinando adquisición de datos de sitio, análisis tradicional y geoestadístico, y visualizaciones de mapas GIS en un paquete practico de toma de decisiones para el usuario final. Esta nueva metodología considera cualquier factor que inflencie en la distribución de humedad de suelo como el diseño del sistema de riego, funcionamiento del sistema, distorsiones de velocidad de viento , escorrentía, alta evapotranspiración de las áreas, textura de suelo, etc. (Carrow y Cline 2011)

Tabla 7. Cuadro comparativo entre colectores (auditoria tradicional) versus TDR 300 (sensor de humedad de suelo)

Descripción	Colectores	TDR 300
Medida del agua aplicada sobre el nivel del césped	•	
Medida del agua aplicada al nivel de la zona radicular		•
El sistema de riego necesita estar encendido cuando se está realizando la prueba	•	
Preparación de las pruebas previas y limpieza posterior la prueba	•	
Pruebas puntuales mientras se camina por el sitio		•
Retención mensurable del agua en todo el sitio		•
Información GPS georreferenciada		•
Datos exportables para el análisis		•
Análisis visual automatizado de datos		•
Acceso a los datos a través del internet		•
Datos almacenados y respaldados en servidores seguros		•

Fuente: Spectrum Technologies

2.7. Manejo específico de campos con el uso de sensores portátiles

La agricultura de precisión (AP) busca identificar, analizar y manejar la variabilidad espacial y temporal dentro de los campos a fin de optimizar la rentabilidad, sostenibilidad y la protección del medio ambiente (Robert et al. 1996). El análisis espacial ha sido usado extensivamente en agronomía para implementar la agricultura de precisión (Taylor et al. 2003). El uso de sensores para el manejo de áreas específicas en césped o también llamado Precision Turfgrass Management (PTM) es un concepto nuevo pero similar a la AP que se centra en mejorar la eficiencia y las decisiones de gestión a través de la aplicación de agua, fertilizantes y cultivo, en el lugar específico, tiempo y cantidad requerida por la planta (Carrow et al. 2010, Krum et al. 2010, Straw y Henry 2018). La PTM fue desarrollado y basado en la premisa del manejo específico de sitio, el cual requiere información detallada del lugar a través del muestreo intenso de datos (Carrow et al. 2010).

2.8. La geoestadística

La geoestadística se utiliza cada vez más en la evaluación de la variabilidad espacial en la ciencia del suelo (Barik et al. 2014). La geoestadística se ocupa de la detección, estimación y mapeo de los patrones espaciales de las variables y se centra en la clasificación e interpretación del semivariograma, este instrumento distingue la variación de los valores separadas por una distancia (Goovaerts y Goovaerts 1997, Isaaks y Srivastava 1989, Rossi et al. 1992). Los modelos de semivariograma proporcionan la información necesaria para kriging, el cual es un método de interpolación de datos de puntos desconocidos. Los semivariogramas han sido probados por ser un método excelente de exploración de la estructura de la variación espacial en suelos de la agricultura (Barik et al. 2014).

El uso de variogramas y técnicas de interpolación ofrece la oportunidad de analizar espacialmente toda la superficie de los campos golf y campos deportivos (Carrow et al. 2010). Las técnicas geoestadísticas en campos deportivos con césped natural es muy escaso, pero hay investigaciones que han evaluado parámetros como humedad de suelo, resistencia a la penetración del suelo, NDVI de césped y volúmenes de agua aplicado por el sistema de riego. Por ejemplo, Miller (2004) utilizó variogramas e interpolación para evaluar la dureza del impacto de dos campos de deportes (arena, suelo nativo) con datos recolectados de 80 ubicaciones en toda la superficie. Carrow et al. (2010, 2010) realizaron el análisis geoestadístico y la variabilidad espacial para el desarrollo, análisis e interpretación de mapas de humedad de suelo y NDVI de césped en un campo de golf. Straw y Henry , Straw et al. (2016, 2018) reportaron mapas y semivariogramas empíricos para los parámetros de humedad de suelo, resistencia a la penetración del suelo, NDVI de césped y volúmenes de agua aplicado por el sistema de riego en campos de fútbol.

2.8.1. Análisis geoestadístico

Varios paquetes de sistema de información geográfica (SIG) tienen instalaciones de análisis geoestadístico. La extensión Geostatistical Analyst (Analista Geoestadístico) de ArcGIS es usado para interpolar y crear mapas (Oliver y Webster 2014) y esta extensión ha sido empleada en investigaciones para generación de mapas en el manejo de césped en campos de golf y fútbol (Krum et al. 2010, Carrow et al. 2010, Straw et al. 2018, Carrow y Cline 2011, Straw et al. 2018, 2016).

2.8.2. Variograma

El variograma también llamado semivariograma permite identificar la naturaleza de la variabilidad espacial de una variable regionalizada (Burgess y Webster 1980). El variograma depende del tamaño de muestra de datos, número de “lags”, intervalo de “lag” o “h”, distribución marginal de la variable, anisotropía y tendencia (Oliver y Webster 2015). En la Fig 9. se observa la nube de puntos del semivariograma de la variable de humedad de suelo, en el eje X la separación h entre las parejas de la muestra de datos y en el eje Y el valor de varianza.

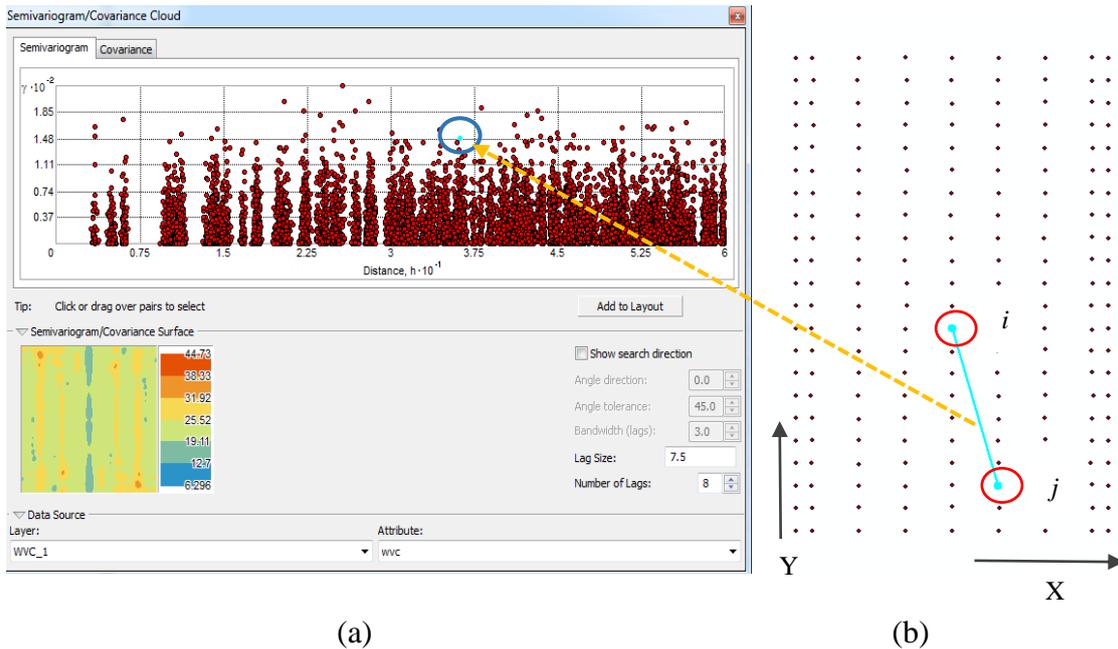


Figura 9: (a) Nube de puntos del semivariograma de humedad de suelo y (b) grilla de datos de la variable humedad de suelo

a. Semivariograma experimental

Se construye el semivariograma experimental para medir la autocorrelación espacial donde se representa en el eje Y la mitad de las diferencias al cuadrado entre cada par de lugares y en el eje X la distancia que los separa. Para calcular las distancias entre dos lugares se utiliza la fórmula de la distancia euclidiana (Moreno Jiménez y Cañada Torrecilla 2006):

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Para calcular la semivarianza experimental, se halla la diferencia entre los valores de esos dos lugares, se eleva al cuadrado y se multiplica por 0.5. La fórmula general es:

$$\gamma = 0.5 \times \text{promedio} [(valor\ de\ lugar\ i - valor\ del\ lugar\ j)^2]$$

En la fórmula figura el promedio, porque lo habitual es agrupar las distancias en un determinado número de intervalos, y después se halla el promedio de las distancias y el promedio de las semivarianzas entre todos los pares de lugares que hay en el mismo intervalo. Esto sucede cuando el tamaño de la muestra es grande y el número de pares de valores que se genera resulta inmanejable. Por ejemplo, un intervalo (lag) estaría constituido por todos los pares de lugares cuyas distancias estuvieran comprendidas entre 0 y 1 metro, entre 1 y 2 metros formarían el segundo intervalo y así sucesivamente. Después se halla el promedio de todos los pares de puntos que hay en cada intervalo (promedio de las distancias y promedio de la semivarianza de los valores) y ese promedio se representa por un punto sobre el semivariograma. En el eje horizontal figuran las distancias (h) y el eje vertical los valores de la semivarianza de la variable en esos lugares $\gamma(h)$. La representación de todos los puntos constituye el semivariograma empírico (Figura 9) (Moreno Jiménez y Cañada Torrecilla 2006).

Para la construcción del semivariograma experimental es necesario conocer el tamaño de “lag” y números de “lag”.

b. Selección del tamaño de “lag”

El tamaño de “lag” se define como la distancia incremental a la que se calcula el variograma. (Coombes 2002). El tamaño del “lag” es el rango espacial sobre el que los pares de ubicaciones son agrupados para reducir la gran cantidad de combinaciones posible entre los datos. Es común usar el espaciamiento de la grilla como la distancia de “lag” (Johnston et al. 2001).

c. Número de “lags”

El número de “lags” a los que se deben calcular los variogramas debe estar restringido por el tamaño de “lag” así como la dimensión de la cobertura de datos. Una regla empírica es restringir el variograma a la mitad de la diagonal de la extensión de datos. La regla general está sujeta a la forma del dominio (Coombes 2002).

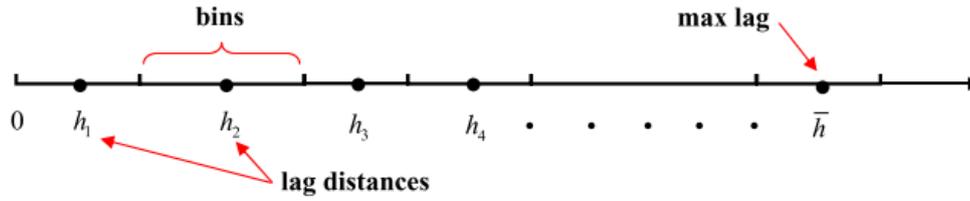


Figura 10: Distancia del Lag y Bins

d. Binning el semivariograma experimental

Para reducir el número de pares de ubicaciones la agrupación deberá ser en base a la distancia y dirección. Ver Fig 11 y Fig 12

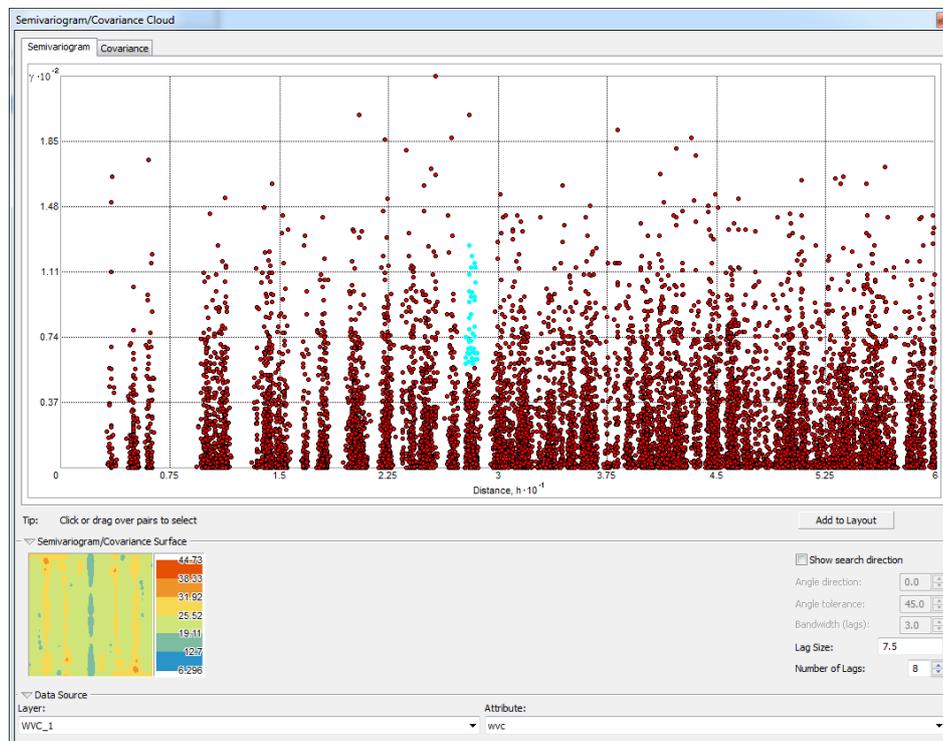


Figura 11: Nube de puntos del semivariograma

En la Fig. 12, se presenta las distancias y dirección entre los pares de valores

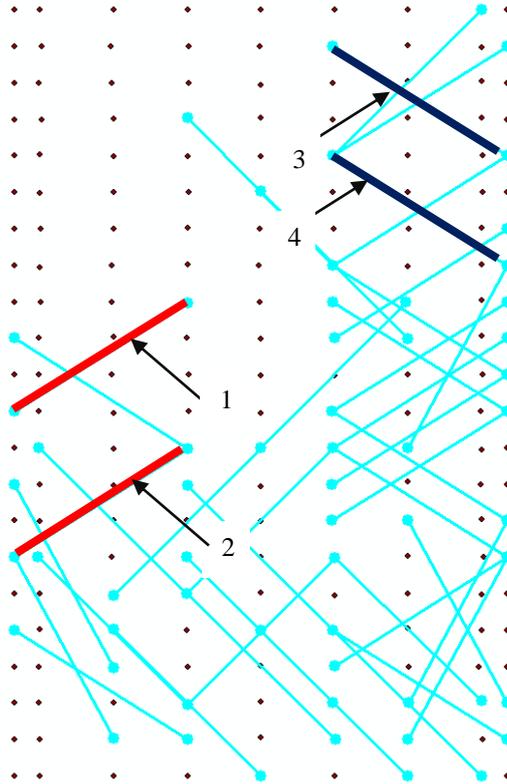


Figura 12: Relación entre pares de puntos

El proceso el Binning es la agrupación de parejas de valores basados en la distancia y dirección. En la Fig. 13 se observa una gráfica con puntos donde cada punto tiene un origen común. Esta propiedad hace la simetría de semivariograma experimental.

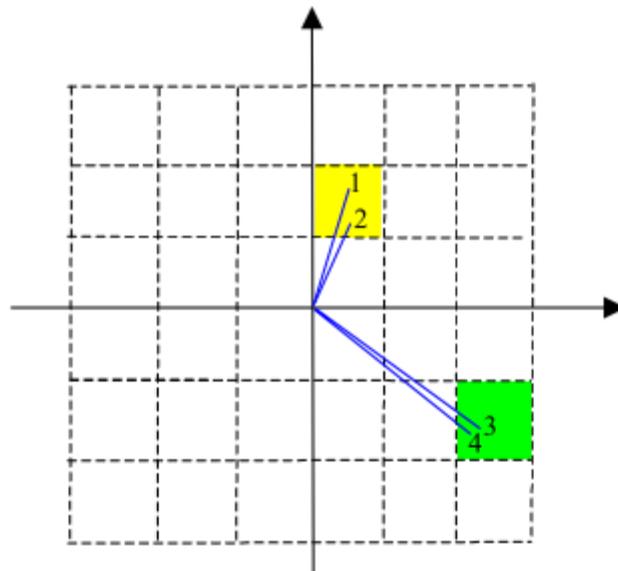


Figura 13: Bins en cada celda de la grilla

Fuente: Johnston et al. (2001)

La relación que tiene 1 y 2 es la similitud en distancia y dirección. Cada celda en la grilla de la figura 12 forma un bin, igualmente 1 y 2 forman otro bin. Para la relación 1 se calcula la varianza entre los dos valores en las dos ubicaciones y similar se realiza en la relación 2. Finalmente se promedia los valores de varianza en 1 y 2 y se obtiene el valor de varianza para el bin (Johnston et al. 2001).

Los valores del semivariograma empírico en cada bin es un color y es denominado superficie del semivariograma. Se observa que los valores se incrementan cuando están más lejos del origen. Esto indica que los valores son menos similares cuando se incrementa la distancia. Ver Figura 14.

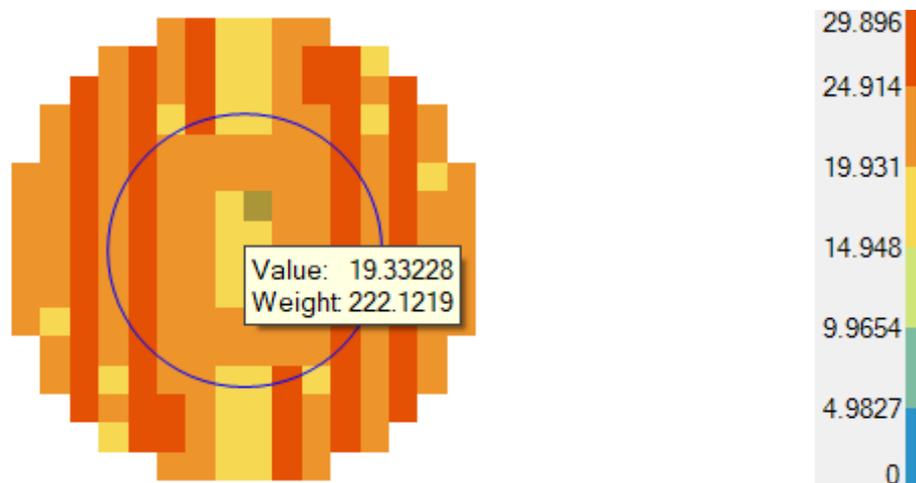


Figura 14: Superficie del semivariograma de la variable humedad de suelo.

En la figura.15, los valores del semivariograma empírico para cada bin y cada dirección es planteado como un punto rojo, donde el eje “Y” representa los valores del semivariograma empírico y el eje “X” es la distancia del centro del bin hacia el origen (centro de la superficie del semivariograma).

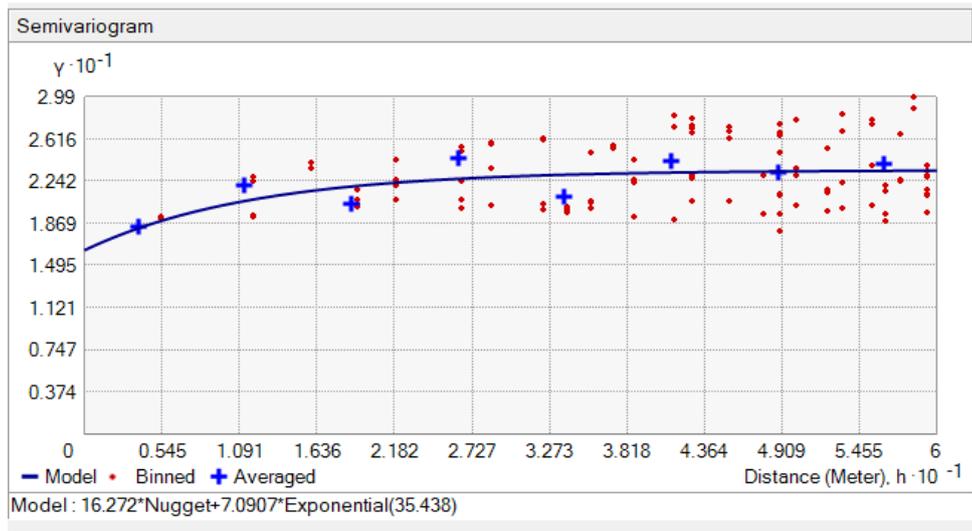


Figura 15: Semivariograma experimental de la variable humedad de suelo.

El semivariograma experimental se ajusta a un modelo teórico para cuantificar el grado y escala de variación espacial. Se ajusta a un modelo teórico debido a que el semivariograma experimental carece de una función matemática precisa para la realización de los cálculos. Entre los modelos de ajuste más utilizados se tiene los modelos: esférico, exponencial, gaussiano, potencial y otros.

En la figura 16, se puede observar que el variograma tiene una función creciente mientras más pequeñas sean las distancias (h) la semivarianza será menor es decir cuando la distancia de separación entre dos valores sea muy corta (González et al. 2007).

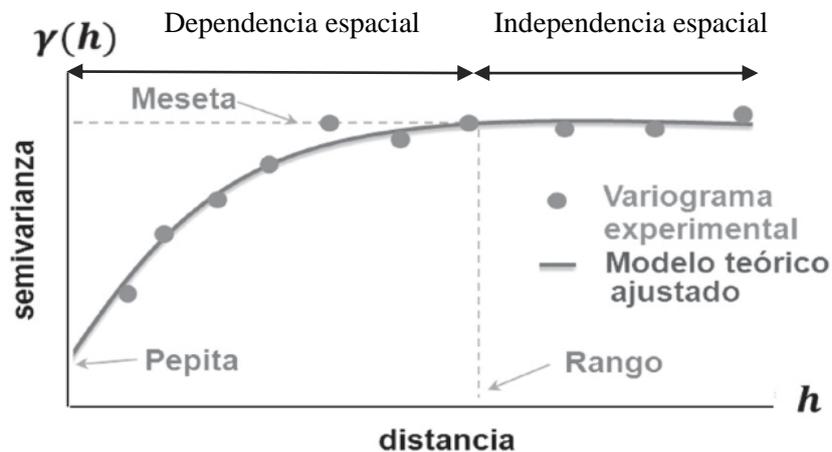


Figura 16: Comportamiento típico de un semivariograma acotado.

Fuente: Piedrahita (2015)

El rango, pepita, meseta and meseta parcial son usados para describir los modelos esfericos y exponenciales de los semivariogramas. El rango, basado en la autocorrelacion espacial de los datos, es la distancia en metros en la que el modelo se estabiliza, que indica la parte espacialmente dependiente del semivariograma, es decir, las distancias de muestreo deben ser menores que el rango si los datos deben estar correlacionados espacialmente para la interpolación. La meseta representa la variabilidad total, la meseta parcial es asociado con componente espacialmente correlacionado de la variabilidad del conjunto de datos, la pepita, indica los errores en la medición y/ o fuentes espaciales de variación a distancias más pequeñas que el intervalo de muestreo (Krum et al. 2010).

2.8.3. Modelos de semivariograma

La herramienta Kriging proporciona las siguientes funciones entre las que se puede escoger para modelar el semivariograma empírico:

- Circular
- Esférico
- Exponencial
- Gaussiano
- Lineal

El modelo seleccionado influye en la predicción de los valores desconocidos, en particular cuando la forma de la curva cercana al origen difiere significativamente. Cuanto más pronunciada sea la curva cercana al origen, más influirán los vecinos más cercanos en la predicción. Como resultado, la superficie de salida será menos suave. Cada modelo está diseñado para ajustarse a diferentes tipos de fenómenos de forma más precisa (Johnston et al. 2001).

En los siguientes diagramas se muestran dos modelos comunes y se identifican las diferencias de las funciones:

a. Modelo esférico

En este modelo se muestra una disminución progresiva de la autocorrelación espacial (así como un aumento en la semivarianza) hasta cierta distancia, después de la cual la autocorrelación es cero. El modelo esférico es uno de los que más se utilizan. (Johnston et al. 2001).

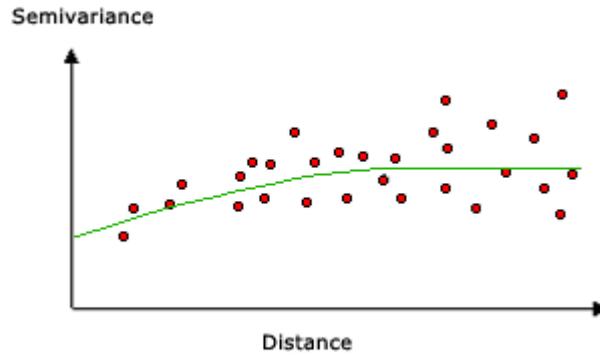


Figura 17: Modelo esférico

Fuente: Johnston et al. (2001)

Tiene un crecimiento rápido cerca al origen (Fig. 17), pero los incrementos marginales van decreciendo para distancias grandes, hasta que para distancias superiores al rango los incrementos son nulos. Su expresión matemática es la siguiente (Giraldo 2011):

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left(\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) & h \leq a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases}$$

En donde C1 representa la meseta, a el rango y h la distancia.

b. Modelo exponencial

Este modelo se aplica cuando la autocorrelación espacial disminuye exponencialmente cuando aumenta la distancia. En este caso, la autocorrelación desaparece por completo sólo a una distancia infinita. El modelo exponencial también es un modelo comúnmente utilizado.

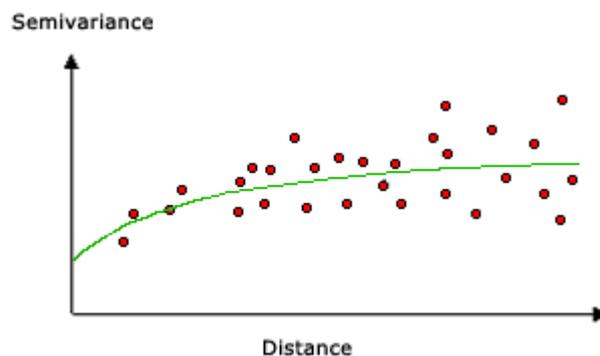


Figura 18: Modelo exponencial

Fuente: (Johnston et al. 2001)

Este modelo se aplica cuando la dependencia espacial tiene un crecimiento exponencial respecto a la distancia entre las observaciones. El valor del rango es igual a la distancia para la cual el semivariograma toma un valor igual al 95% de la meseta (Fig. 18). Este modelo es ampliamente usado. Su expresión matemática es la siguiente (Giraldo 2011):

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right) \right)$$

2.8.4. Kriging

Kriging es un procedimiento de interpolación, que proporciona la mejor estimación lineal e imparcial, se ha aplicado universalmente en las ciencias ambientales para analizar la variabilidad espacial y resolver problemas específicos del sitio (Goovaerts y Goovaerts 1997, Júnior et al. 2006). Kriging encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción. En la tabla 8 se mencionan los tipos de kriging y algunas de sus propiedades.

Este método genera predicciones no sesgadas de ubicaciones no muestreadas utilizando la variabilidad espacial obtenida del modelo de variograma (Isaaks y Srivastava, 1989).

Tabla 8. Tipos de interpolación kriging y sus propiedades

Tipo de predictor	Nombre	Propiedades
Lineal	<ul style="list-style-type: none"> • Simple • Ordinario • Universal 	<ul style="list-style-type: none"> • Son óptimos si hay normalidad multivariada. • Independiente de la distribución son los mejores predictores linealmente insesgados.
No lineal	<ul style="list-style-type: none"> • Indicador • Probabilístico • Log normal • Trans Gaussiano • Disyuntivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Son predictores óptimos.

Fuente: (Johnston et al. 2001)

Las herramientas de interpolación IDW (distancia inversa ponderada) y Spline se conocen como métodos determinísticos de interpolación porque están basados directamente en los valores medidos o en fórmulas matemáticas específicas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Hay una segunda familia de métodos de interpolación que consta de

métodos geoestadísticos, como kriging, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Las técnicas de estadística geográfica no sólo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones (Johnston et al. 2001).

Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta Kriging ajusta una función matemática a un número específico de puntos o a todos los puntos dentro de un radio especificado, para determinar el valor de salida para cada ubicación. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y la geología. (Johnston et al. 2001).

2.9. Elaboración de mapas de unidades específicas de manejo de área o Site-Specific Management Units (SSMUs)

Dentro de los programas para generar mapas GIS, la información pueden ser clasificados (valores de leyenda y número de clases) para delinear SSMU por varios métodos por ejemplo desviación estándar (DE), cuantil, Jenk's, natural break y 1/3 query y histogramas class break. Se debe tener cuidado de utilizar los esquemas de clasificación de datos más apropiados porque los mapas asociados influyen en los límites SSMU. Por ejemplo los métodos de clasificación manual, cuantil y 1/3 query organizan los datos de manera arbitraria porque class break son independientes de la distribución del conjunto de datos, por lo tanto, los intervalos no reflejan consideraciones agronómicas. El método histogram class break puede implicar selección manual o divisiones generada por el programa de computadora. La clasificación SD usa divisiones de una unidad SD en relación con la media lo que ayuda a identificar las áreas de los datos más altos y más bajos (Krum et al. 2010).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

La investigación fue realizada en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y en el Estadio Nacional de Lima, durante la estación de otoño e invierno en los meses de mayo a septiembre del 2018. El campo deportivo profesional del Estadio Nacional (67,0 m de ancho x 105,0 m de largo) está sembrado con césped bermuda mirage (*Cynodon dactylon*) para la estación de verano y raigrás (*Lolium perenne* L.) y festuca alta (*Festuca arundinacea*) para la estación de invierno; este campo es principalmente usado para juegos de fútbol profesional y eventos como conciertos o festivales. El área verde de la UNALM (21,0 m de ancho x 45,0 m de largo) está sembrado con césped americano (*Stenotaphrum secundatum*) y es de uso recreacional y paisajista.

3.2. Suelo

Se tomó un conjunto de 11 muestras de suelo (5 cm de altura y 5 cm de diámetro) para determinar la textura, la densidad aparente y las constantes hídricas del suelo del Estadio Nacional; asimismo, 20 muestras de suelo del área verde de la UNALM. Los métodos de bouyoucos y cilindro metálico fueron usados para determinar la textura del suelo y de densidad de suelo respectivamente.

3.3. Clima

Las mediciones de las variables de clima, como la temperatura, humedad relativa, evapotranspiración, velocidad y dirección de viento, fueron recolectadas de las estaciones meteorológicas del Campo de Marte y Von Humboldt del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La expresión matemática para el cálculo de la evapotranspiración fue mediante el método de Hargreaves. Los valores de velocidad de viento fueron recolectados con un anemómetro a 1 metro de altura en ambas locaciones, específicamente para las pruebas de DU en base al volumen de agua en colectores (VAC), las cuales fueron realizadas en el horario de 6:30 am a 8:00 am.

3.4. Agua

La fuente de agua del sistema de riego por aspersión de la UNALM es del río Rímac y según el análisis microbiológico de enumeración de coliformes fecales, enumeración de *Escherichia coli*, conteo de larvas y huevos de helmintos, se reportaron que los valores de la muestra de agua se encontraron en los rangos de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. El agua utilizada para el sistema de riego por aspersión del Estadio Nacional es potable y obtenida de la red urbana.

3.5. Sistema de riego

El Estadio Nacional y UNALM utilizan sistema de riego por aspersión para sus áreas verdes. El sistema del Estadio Nacional cuenta con 6 cañones emergentes serie 977 OLIMPIA marca VYR y boquillas (26 X 7 mm). El tiempo de riego para la estación de invierno fue de 6 minutos por día para cada cañón que gira 180° y 3 minutos para el cañón que gira 90°. La presión del sistema fue de 60 metros de columna de agua (mca), el campo no tiene un sistema de drenaje subterráneo. El sistema de riego de la UNALM está comprendido por rotores “pop up” serie 5000 de la marca Rain Bird y boquillas (1.5 para el giro de 180° y 2.5 para el giro de 360°), el tiempo de riego para la estación de invierno fue de 15 minutos por día. La presión en el arco de riego fue de 35 mca.

3.6. Uniformidad de distribución

La determinación de la DU_{1q} en base al VAC, consistió en medir la distribución del agua sobre el follaje de las plantas, esta medida fue obtenida colocando colectores de plástico (10 cm de diámetro x 5 cm de profundidad). La ubicación de estos recipientes fue acorde al grillado de cada zona: 10 m x 5 m para el Estadio Nacional y 3 m x 3 m para la UNALM, ver Fig. 19. Los tiempos de riego para las pruebas de uniformidad fueron de 60 minutos para el área verde de la UNALM y de 6 minutos por cañón que gira 180° y 3 minutos para el cañón que gira 90°, en el Estadio Nacional. Los volúmenes de agua recolectados fueron medidos con una probeta de 100 ml. La determinación de la DU_{1q} en base al θ_v , se realizó cuando el estado hídrico del suelo se encontró capacidad de campo. Según Krum et al (2010), cuando se monitorea la humedad de suelo a capacidad de campo no existe implicancias que afectan la variabilidad espacial por factores externos.

La uniformidad de distribución del cuarto inferior (DU_{1q}) puede ser usada para determinar el factor de corrección para el tiempo de riego o también llamado “Scheduling multiplier” (SM) para la programación de riego (Irrigation Association USA 2013). La programación de riego está basada en la eficiencia de riego, la cual es determinada por el manejo eficiente y la uniformidad de distribución, donde el SM es un valor adimensional y su aplicación es compensar o ajustar razonablemente el número de minutos para la programación de riego en el controlador, debido a la falta de uniformidad causada por el aspersor y el sistema instalado en base a un diseño no adecuado (Krum et al. 2010, Irrigation Association USA 2013, Mecham et al. 2001), el cálculo de la SM fue propuesta por la Irrigation Association (2013):

$$SM = \frac{1}{(0.4 + (0.6 \times DU_{1q}))}$$

Donde:

SM: Factor de corrección para el tiempo de riego o “Scheduling multiplier”, sin unidades

DU_{1q} : Uniformidad de distribución del cuarto inferior

3.7. Sensores portátiles

Para la medición del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), la resistencia a la penetración del suelo (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se usaron los sensores portátiles: Time Domain Reflectometry (TDR) modelo 350, Soil Compaction (SC) modelo 900 y Turf Color Meter (TCM) modelo 500 respectivamente; estos sensores son de la marca Spectrum Technologies USA. Las mediciones fueron registradas en cada punto de la grilla, obteniéndose 198 y 128 mediciones por cada propiedad medida, para el Estadio Nacional y el área de estudio de la UNALM respectivamente, ver Fig.19.

La medición del θ_v fue en base a TDR, el cual mide los cambios de la constante dieléctrica en el suelo (ϵ) a medida que el contenido de agua cambia el perfil del suelo (Leib et al. 2003). Se usaron las varillas de acero inoxidable de 5,0 mm de diámetro, 3,3 cm de espaciamento entre varillas y longitud de 3” (7,5 cm) para el Estadio Nacional y 4,8” (12,0 cm) para la UNALM. El sensor fue calibrado en el laboratorio de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola, se usó el método gravimétrico en base a peso y densidad aparente.

Para la medición de la RP se usó una punta de cono de diámetro de 1/2” recomendable para suelos finos y un sensor ultrasónico de distancia que determina la profundidad de penetración del eje metálico una vez que se inicia la medición. El eje se inserta lentamente a velocidad constante sobre la superficie y se registraron las mediciones en MPa. La profundidad a la cual se midió la RP fue a 5,0 cm en el Estadio Nacional y 10,0 cm en el área de estudio de la UNALM respectivamente.

El NDVI proporciona una indicación del color, porcentaje de cobertura verde y densidad (Trenholm et al. 1999, Bell et al. 2002, Bremer et al. 2011). El TCM 500 usa la fuente de luz interna para medir la luz reflejada en las bandas roja (R=660nm) e infrarroja (NIR=850nm) del espectro electromagnético en una sección de 10 cm aproximadamente, para calcular el NDVI, se usó la siguiente expresión matemática, $NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$. El NDVI fue calculado en el rango de 0 a 1, donde el valor de 1 indica la mejor vigorosidad del césped.

3.8. Grillado

Los grillados fueron usados para la creación de mapas espacio temporales del contenido volumétrico de agua del suelo (%), resistencia a la penetración del suelo (MPa), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y volumen de agua en los colectores (mL).

En la figura 19, se presentan los grillados para el Estadio Nacional y UNALM.

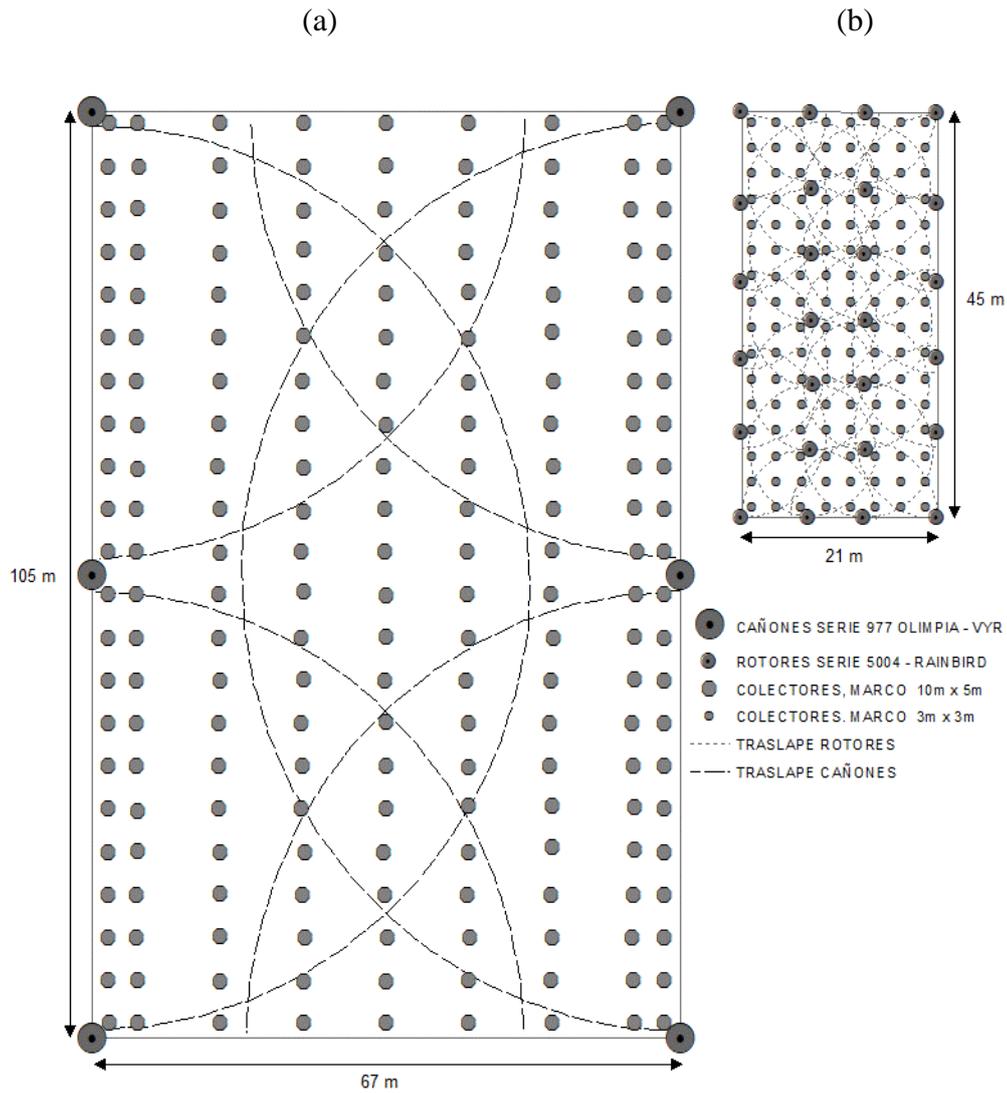


Figura 19: (a) Estadio Nacional grillado 10 m x 5 m y (b) UNALM grillado 3 m x 3 m.

3.9. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de datos se utilizó el software STATA para la determinación y evaluación de valores máximos, mínimos, media, desviación estándar (SD), coeficiente de variabilidad (CV) (Simons 2019). Se presentó y analizó un modelo de regresión lineal múltiple entre el θ_v , el NDVI, la RP y el VAC.

3.10. Mapas de superficie

El software ESRI Arc Gis GIS fue usado para desarrollar, analizar e interpretar los mapas (Johnston et al. 2001). Las estructuras espaciales del θ_v , la RP y el NDVI fueron evaluadas con variogramas, las cuales representan la mitad de diferencia cuadrada del valor entre dos

puntos para todos los pares de un conjunto de datos en el eje y, y la distancia entre dos puntos para todos los pares en el eje axial x (Clark 1979). La extensión análisis geoestadístico del software ArcMap fue usado para determinar el semivariograma experimental, luego se seleccionó el modelo que mejor se ajustaba a los datos del semivariograma. El criterio para seleccionar el mejor modelo fue el de menor valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Los modelos evaluados fueron exponencial y esférico.

El trazado de mapas de superficie de los datos fue usado para visualizar la variabilidad espacial del VAC, el θ_v , la RP y el NDVI. Los mapas se generaron trazando primero los semivariogramas experimentales, donde el número de “lags” se calculó a partir de la mitad de la máxima distancia de toda la información dividido por el espaciamiento de la grilla (Schabenberger y Gotway 2004). El tamaño del lag utilizado fue el espaciado de la grilla de la muestra, la grilla del Estadio Nacional no fue simétrica, por lo que se utilizó el promedio de 7,5 para la grilla de 10 m x 5 m. Obtenido el modelo del semivariograma y sus parámetros, se crearon los mapas de superficie. El método de interpolación seleccionado fue el de Kriging ordinario, para estimar los valores de los puntos del campo, que no fueron muestreados. Se determinó 10 intervalos para la leyenda del VAC, el θ_v , la RP y el NDVI.

3.11. Evaluación espacio temporal de θ_v , RP y NDVI

El contenido volumétrico de agua del suelo, resistencia a la penetración del suelo e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada de césped fueron medidos en cada punto del grillado en tres fechas luego del riego estas variables fueron recolectadas en las siguientes fechas: el 25 de junio (día 1), 28 de junio (día 4) y 03 de julio (día 9) del 2018 para el Estadio Nacional. En las áreas verdes en estudio de la UNALM la información fue recolectada después del riego en las siguientes fechas el 30 de junio (día 1), 04 de julio (día 5) y 07 de julio (día 8) del 2018.

3.12. Dependencia espacial

La relación entre la pepita “nugget” y la meseta “still” fue usado para evaluar la dependencia espacial. Según (Camdardella et al. 1994) la relación ente nugget/still, <25% indican una fuerte dependencia espacial , 25-75% indica moderada dependencia espacial; y >75% indica una débil dependencia espacial.

3.13. “Site-Specific Management Units” (SSMUs) o Unidades específicas de manejo de área

La conformación de unidades específicas de manejo de área de los mapas para el manejo del VAC, el θ_v , el NDVI y la RP, fue realizada siguiendo el protocolo de manejo espacial de campos de césped propuesto por Krum et al. (2010), donde la clasificación de la leyenda de los mapas se realizó en base a la desviación estándar (DE) y la media. Para crear los 2 intervalos, superior e inferior de leyenda, se sumó o resto la DE respectivamente. Una ventaja de definir intervalos de mapas por DE es que se presenta claramente las clases más altas y más bajas, que son de mayor interés para las decisiones de manejo (Krum et al. 2010). Los intervalos de la leyenda fueron cinco para el Estadio Nacional y la UNALM.

Los mapas basados en DE se usaron como una guía para determinar los límites de las unidades específicas de manejo de área. Se usó la herramienta "create feature" en ArcMap para la creación de las SSMUs. Es importante determinar la menor cantidad de SSMUs dentro de cada campo (Krum et al. 2010); por lo tanto, se clasificó las SSMUs como baja, moderada y alta utilizando las clasificaciones de la leyenda basadas en la DE. Las SSMUs altas y bajas fueron típicamente más o menos 0,5 DE de la media. Las pequeñas áreas no se clasificaron en una unidad específica de manejo individual debido a su tamaño y fueron agrupadas en una unidad de mayor tamaño o áreas pequeñas similares. Para evaluar los parámetros estadísticos de las nuevas unidades agrupadas se utilizó la herramienta "Zonal Statistics as table" en ArcMap para calcular los valores mínimos, máximos, rangos, medias, desviaciones estándar, coeficientes de variabilidad, área total y porcentajes de las SSMUs en ambos campos (Krum et al. 2010, Straw 2017).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Suelo y césped

La clase textural del suelo fue arenoso franco y franco arenoso para el Estadio Nacional y UNALM respectivamente. Ver tabla 9. La especie de césped en el estadio nacional es Bermuda para la estación de verano y especies como Rye grass y Tall fescue en la estación de invierno, se observó en el campo de futbol la presencia de las 3 especies de césped con predominancia de bermuda en los meses de recolección de la información; y la altura de raíces está comprendida entre 10cm y 15 cm. En la UNALM, la especie de césped es el americano durante todo el año, la altura de raíces está comprendida entre 15 cm y 25cm.

Tabla 9. Fecha de muestreo, dimensiones del área, especie de césped, densidad aparente y textura de suelo para el Estadio Nacional y UNALM

Locación	Fecha de muestra	Especie de césped	Densidad aparente (gr/cm ³)	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Clase textural de suelo
Estadio Nacional	18/07/2018	Bermuda, Rye grass y Tall Fescue	1.38	85%	5%	10%	Arenoso franco
UNALM	13/06/2018	Americano	1.37	69%	4%	27%	Franco arenoso

4.2. Tamaño de grilla para muestreo del volumen de agua en los colectores (VAC), el contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), la resistencia a la penetración (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

En la presente investigación se utilizó sensores portátiles y una grilla de 10 x 5 m (198 muestras) para el campo deportivo del Estadio Nacional y de 3 x 3 m (128 muestras) para el área verde en estudio de la UNALM. Cabe señalar que Oliver y Webster (2014, 2015) propusieron que se necesita un mínimo de 100 muestras para crear un semivariograma confiable para aplicar el método de “Kriging”. En general, a mayor número de muestras recolectadas se obtendrá mayor precisión (Straw y Henry 2018). Cinco investigaciones han

realizado análisis espaciales de las propiedades de la superficie de campos deportivos con equipos portátiles de medición. Primero, Miller (2004) midió la dureza superficial del suelo en dos campos de soccer con un Clegg Impact Soil Tester (CIST) (Lafayette Instrument Co., Lafayette, IN) con una grilla de 10 x 10m (80 muestras). Segundo, Freeland et al. (2008) midieron la dureza superficial del suelo con una grilla de 9,1 x 9,1m (77 muestras). Tercero, Caple (2011) recolectó información de algunas propiedades del suelo, no se especificó el tamaño de la grilla, pero si el número de muestras (135 a 150 muestras dependiendo del campo). Cuarto, Straw et al. (2016) midió el θ_v , la RP, el NDVI con una grilla de 4,8 x 4,8 m y 4,8 x 9,6m donde las diferencias entre los valores de ambos grillados fueron mínimos por lo que escogió el grillado de 4.8 x 9.6 m (120 – 130 muestras) para los muestreos con equipos portátiles - manuales. Finalmente, Straw et al. (2018) reportaron que la grilla de muestreo de 4,8 x 9,6m es la más adecuada y óptima para medir el θ_v y la RP para el análisis espacial en campos deportivos de césped natural. En la presente investigación se tomó como referencia la grilla propuesta por Straw et al. (2018).

4.3. Comparación de la uniformidad de distribución del cuarto inferior del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) y volumen de agua en los colectores (VAC)

El uso de sensores de humedad de suelo es una nueva metodología para la auditoria de agua, basada en el mapeo de humedad de suelo, lo cual implica una mayor integración de la variación espacial de la humedad del suelo en el área evaluada, a diferencia de la metodología tradicional que usa colectores (Irrigation Association USA 2013). En la presente investigación se evaluó y comparó ambas metodologías para determinar la uniformidad de distribución del cuarto inferior (DU_{lq}), obteniéndose para el Estadio Nacional valores de DU_{lq} basado en el θ_v de 73,0% y 69,0% y las DU_{lq} obtenidas mediante el VAC de 47,0% y 51,0%. En el caso de la UNALM, los valores de DU_{lq} basado en el θ_v fueron de 68,0% y 69,0% y las DU_{lq} basado en el VAC fueron de 61,0% y 54,0%. Se observó que la DU_{lq} basado en el θ_v fue mayor que la DU basado en el VAC en ambos lugares de la investigación, los valores de DU_{lq} altos indican mayor uniformidad de aplicación de agua sobre el césped o perfil del suelo (Tabla 10), las fechas y condiciones de clima de las pruebas de campo de DU basado en el VAC y θ_v son presentadas en la (Tabla 11).

Tabla 10. Uniformidad de distribución del cuarto inferior (Du_{lq}) del contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) y el volumen de agua en los colectores (VAC) después del riego; y factor de corrección para el tiempo de riego (SM) en el Estadio Nacional y la UNALM.

Variable	Fecha	Min (%)(mL) †	Max (%)(mL) †	Media (%)(mL) †	SD (%)(mL) †	CV (%)	Du_{lq} (%)‡	SM
Estadio Nacional								
θ_v	28/06/2018	18,6	38,8	29,2	4,8	16,6	73,0	1,19
	03/07/2018	16,5	37,0	26,5	5,1	19,1	69,0	1,23
	promedio	17,5	37,9	27,8	4,9	17,8	71,0	1,21
VAC	04/06/2018	0,0	55,0	19,5	9,6	49,3	47,0	1,47
	17/09/2018	4,0	45,0	18,3	8,4	45,9	51,0	1,42
	promedio	2,0	50,0	18,9	9,0	47,6	49,0	1,44
UNALM								
θ_v	07/07/2018	21,9	31,8	26,9	2,2	8,2	68,0	1,24
	10/07/2018	21,9	33,1	27,7	2,3	8,4	69,0	1,23
	promedio	21,9	32,5	27,3	2,3	8,3	68,5	1,23
VAC	19/05/2018	18,0	150,0	75,8	29,6	39,1	61,0	1,31
	26/05/2018	6,0	170,0	75,2	32,7	43,5	54,0	1,38
	promedio	12,0	160,0	75,5	31,2	41,3	57,5	1,34

† θ_v es medido en porcentaje; colectores es medido en mililitros.

‡ $Du_{lq} = (\text{promedio del cuarto inferior de los datos} \div \text{promedio de toda la información}) \times 100$.

Tabla 11. Condiciones de climáticas cuando fueron recolectados los datos para la uniformidad de distribución de contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) y el volumen de agua en los colectores (VAC) en el Estadio Nacional y UNALM.

Fecha	Temp. minima (°C)	Temp. maxima (°C)	HR (%)	ETo (mm)	Velocidad de viento (m/s)	Dirección de viento
Estadio Nacional						
28/06/2018	14,9	17,0	86,2	1,3	0,2	SW
03/07/2018	14,9	19,3	85,4	2,5	0,25	SW
04/06/2018	15,8	19,3	92,6	1,7	0,2	SW
17/09/2018	14,9	19,6	86,3	2,5	0,2	SW
UNALM						
04/07/2018	13,8	17,5	84,9	1,7	0,5	SW
07/07/2018	14,2	15,5	89,1	1,0	0,5	SW
19/05/2018	13,8	23,8	77,0	3,2	0,4	NW
26/05/2018	14,6	21,8	82,1	2,7	0,1	SW

Los resultados obtenidos coinciden con los de otras investigaciones y confirma que la DU basado en el θ_v es mayor al DU_{lq} basado en el VAC (Straw et al. 2018, Kieffer y Huck 2008, Kieffer y Connor 2007, Vis et al. 2007). En la investigación de Straw et al (2018) en dos campos deportivos, se reportaron valores de DU basados en el θ_v de 66,8% y 73,8%, mayores a DU basado en los VAC de riego 55,8% y 71,0%. Kieffer y Huck (2008) reportaron que la DU basado en el θ_v , usando la varilla 4.8" alcanzo valores de 88,0%, 87,0% y 84,0% para el nivel de tráfico del campo alto, medio y bajo respectivamente; y usando la varilla de 3" obtuvo valores de 89,0%, 88,0% y 83,0% para el nivel de tráfico de alto, medio y bajo respectivamente, asimismo reportó las DU basadas en el VAC de 62,0%, 78,0% y 65,0% para el nivel de tráfico de alto, medio y bajo respectivamente. Vis et al. (2007) reportó que el promedio de la DU basado en el θ_v fue de 85% y el promedio de DU basado en el VAC fue de 70,0%.

Irrigation Association - USA (2013, 2011) recomienda que las auditorías de basadas en el θ_v o las auditorias tradicionales basadas en el VAC, sean precedidas por una evaluación completa del sistema de riego para garantizar el máximo rendimiento; esta evaluación comprende la inspección de los aspersores, los controladores de riego, las estaciones meteorológicas, las estaciones de bombeo, las electroválvulas y las válvulas de aire.

En el Estadio Nacional, el SM promedio en base al θ_v fue 1,21 y en base al VAC fue 1,44. En la UNALM, el SM promedio en base al θ_v fue 1,23 y en base al VAC fue 1,34 (Tabla 10). En ambas locaciones el SM en base θ_v fue menor, esto fue por un mayor de la DU_{lq} , lo que conlleva a el ahorro de tiempo y agua en la programación de riego. El SM en base a humedad de suelo conduce a que el tiempo de riego sea más corto sin sacrificar la calidad del césped, esto genera a que el requerimiento de agua para el riego sea menor (Mecham et al. 2001, Kieffer y Connor 2007).

4.4. Evaluación espacio temporal del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), la resistencia a la penetración (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Los análisis estadísticos del contenido volumétrico de agua, resistencia a la penetración y NDVI son presentados en la tabla 12. El tamaño de la muestra fue 198 y 128 datos para el Estadio Nacional y UNALM respectivamente.

En el Estadio Nacional, los días de evaluación fueron los días 1, 4 y 9, el contenido volumétrico de agua en el suelo decreció en 9.3 % respecto a la humedad inicial, desde el día 1 (\bar{x} = 29.2%) hasta el día 9 (\bar{x} =26.5%). La resistencia a la penetración del suelo incremento en 110.2% respecto a la RP inicial, desde el día 1 (\bar{x} = 2.7 Mpa) hasta el día 9 (\bar{x} =3.0Mpa). El NDVI de césped decreció en 3.7% desde el día 1 (\bar{x} = 0.59) hasta el día 9 (\bar{x} =0.57).

En la UNALM, los días de evaluación fueron los días 1, 5 y 8, el contenido volumétrico de agua en el suelo decreció en 2.0 % desde el día 1 (\bar{x} = 28.3%) hasta el día 8 (\bar{x} =27.7%). La resistencia a la penetración del suelo incremento en 165.1% desde el día 1 (\bar{x} = 0.6 Mpa) hasta el día 8 (\bar{x} =1.7Mpa). El NDVI de césped incremento en 3.8% desde el día 1 (\bar{x} = 0.57) hasta el día 8 (\bar{x} =0.60).

Tabla 12. Descripción estadística del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para cada día del periodo de monitoreo en el campo deportivo del Estadio Nacional y UNALM

Propiedad	Día	Tamaño de muestra	Min	Max	Media	SD	CV%
Estadio Nacional							
θ_v %	1	198	17.6	38.6	29.2	4.8	16.6
	4	198	18.6	38.8	29.2	4.8	16.6
	9	198	16.5	37.0	26.5	5.1	19.1
RP Mpa	1	198	1.0	4.3	2.7	0.9	32.7
	4	198	1.1	4.3	2.7	0.8	29.7
	9	198	0.9	4.5	3.0	1.0	32.9
NDVI	1	198	0.13	0.79	0.59	0.1	11.1
	4	198	0.44	0.77	0.64	0.1	8.9
	9	198	0.35	0.77	0.57	0.1	12.8
Área verde urbana – UNALM							
θ_v %	1	128	17.6	32.4	28.3	2.2	7.8
	5	128	21.9	31.2	26.9	2.2	8.3
	8	128	21.9	33.1	27.7	2.4	8.5
RP Mpa	1	128	0.2	1.6	0.6	0.3	41.8
	5	128	0.1	1.6	0.7	0.3	47.3
	8	128	0.0	4.3	1.7	0.8	45.2
NDVI	1	128	0.32	0.74	0.57	0.1	9.5
	5	128	0.37	0.69	0.59	0.1	8.9
	8	128	0.40	0.77	0.60	0.1	9.9

Straw y Henry (2018) evaluaron los cambios espacio temporales θ_v , RP y NDVI en dos campos de deporte, el campo 1 con textura de suelo franco arenoso y el campo 2 con textura de suelo arenoso. En ambos campos la θ_v decreció, el campo 1 en 67% desde el día 1 al día 11; y el campo 2 en 33% desde el día 1 al día 8. Asimismo, la RP incremento en 142% desde el día 1 al día 11 en el campo 1; e incremento en 119% desde el día 1 al día 8 en el campo 2. El NDVI decreció en 22% desde el día 1 al día 11 en el campo 1; y decreció en 8% del día 1 al día 8 en el campo 2. La presente investigación corrobora que el θ_v disminuye, la RP se incrementa y el NDVI disminuye cuando se deja de regar.

En el Estadio Nacional, el CV del θ_v fue de (16.6 , 16.6 y 19.1) y la media de (29.2, 29.2, 26.5) en días 1, 4 y 9 respectivamente, ambos valores iguales de CV y media para el día 1 y día 4 esto fue por la baja evapotranspiración del césped y al estado hídrico del suelo, debido a que el día 1 fue una fecha después al riego y el suelo se encontró a capacidad de campo y la temperatura del ambiente fue baja 14.9 °C, humedad relativa alta 89.1 % y velocidad de viento alto 2.9 m/s . Straw et al.(2018) reporto que los valores bajos de CV se deben a que el estado hídrico del suelo está cerca de capacidad de campo e indica que existe menos variabilidad en la información en comparación cuando el suelo se encuentre en un estado de secamiento. En el campo de la UNALM, el CV del θ_v fue incrementando ligeramente del día 1 al día 5 al día 8 en 7.8, 8.3 y 8.5 respectivamente, esto puede reflejar que conforme se va secando el suelo la variabilidad del suelo se incrementa.

En el Estadio Nacional el CV de la RP fue menor al CV de la UNALM, esta última podría ser debido a que en el campo de futbol se muestreo cuando el suelo estuvo cerca de capacidad de campo. Straw et al.(2016) cita que cuando se muestrea a capacidad de campo, el operador tiene la facilidad de hacer la penetración del cono. Sin embargo existió un promedio mayor de (3.0 Mpa) de RP el campo de futbol a comparación del área recreativa (1.7 Mpa) esto podría ser a que el tránsito y pisoteo es mayor en el campo de fútbol.

La resistencia de penetración de 2MPa produce restricción al crecimiento de la raíz y una resistencia de 3Mpa crea una barrera total al alargamiento de la raíz en suelos francos arenosos (Duffera et al. 2007). Los factores del suelo como el contenido de agua de suelo, densidad aparente del suelo y estructura también influyen en la resistencia a penetración del suelo (Cassel 1983). La humedad de suelo influye en las propiedades físicas del suelo en campos deportivos de césped (Straw et al. 2018). A medida que el suelo se seca por debajo

de la capacidad de campo, la resistencia a la penetración aumenta fuertemente en el suelo (Henderson et al., 1988), lo que hace que la penetración del cono sea más difícil para un operador que utiliza dispositivos de mano (Straw et al. 2016). La compactación de suelo causa disminución en el crecimiento, calidad y persistencia en el césped debido a impactar negativamente con la aireación del suelo, resistencia del suelo o las relaciones entre planta y humedad de suelo (Straw y Henry 2018) . Otras variables que afectan la variabilidad de las propiedades del suelo son los horarios de prácticas de juego, sistema de irrigación, diseño y capacidad de drenaje (Straw et al. 2018).

En el Estadio Nacional, el CV del NDVI fue de 11.1% a 12.8% para el día 1 y 9 respectivamente. En la UNALM, el CV del NDVI fue de 9.5% a 9.9% para el día 1 y 8 respectivamente. Para el Estadio Nacional la variabilidad podría ser debido al incremento de compactación por la restricción de agua y uso del campo. En la UNALM el incremento de variabilidad fue mínimo.

Para el Estadio Nacional el mayor valor promedio de NDVI fue de 0.64 y se presentó en el día 4 y para la UNALM fue de 0.60 y se presentó en el día 8. El rango de medición del NDVI es de 0 a 1, el valor de NDVI menor a 0.5 es considerado como no aceptable. Según la Federación Peruana de Fútbol el césped del Estadio Nacional debe cumplir estándares de calidad, una de las pruebas de rendimiento es la evaluación del NDVI.

4.4.1. Geoestadística

El metodo de interpolacion fue kriging ordinario para obtener mapas SSMUs del θ_v , la RP y el NDVI (Flitcroft et al. 2010, Straw y Henry 2018). Se generó los semivariogramas que cuantificaron la auto correlación espacial de los datos. Los parametros del semivariograma como el rango, la pepita, la meseta and la meseta parcial son usados para describir los modelos esfericos y exponenciales de los semivariogramas.

Los parámetros de semivariograma usados para crear los mapas de θ_v , RP y NDVI; y también el RMSE son presentados en tabla 13.

El range, basado en la autocorrelacion espacial de los datos, es la distancia en metros en la que el modelo se estabiliza, que indica la parte espacialmente dependiente del

semivariograma, es decir, las distancias de muestreo deben ser menores que el rango si los datos deben estar correlacionados espacialmente para la interpolación (Krum et al. 2010). Para el θ_v el rango fue 35.43, 25.3 y 53.0 para el día 1, 4 y 9 respectivamente en el Estadio Nacional y 27.0, 26.19 y 27.0 para el día 1, 5 y 8 respectivamente en la UNALM, verificando que la grilla de muestreo seleccionado fue suficiente, asimismo los rangos para la RP y NDVI cumple con lo establecido anteriormente.

Los modelos exponencial y esférico se determinaron para todos los semivariogramas de cada parámetro medido. En el Estadio Nacional el modelo que mejor se ajustó para el semivariograma de contenido volumétrico de agua fue el exponencial (día 1, RMSE 4.48; día 4, RMSE 4.11; día 9, RMSE, 4.67) y para la resistencia a la penetración del suelo fue el modelo exponencial (día 1, RMSE 0.77; día 4, RMSE 0.68; día 9, RMSE, 0.64) y el modelo que mejor se ajustó para el semivariograma de NDVI fue el esférico (día 1, RMSE 0.06; día 4, RMSE 0.05; día 9, RMSE, 0.06).

En la UNALM, el modelo que mejor se ajustó para el semivariograma de contenido volumétrico de agua fue el exponencial (día 1, RMSE 1.81; día 4, RMSE 1.76; día 9, RMSE, 2.02) y para la resistencia a la penetración del suelo fue el modelo exponencial (día 1, RMSE 0.24; día 4, RMSE 0.31; día 9, RMSE, 0.71) y el modelo que mejor se ajustó para el semivariograma de NDVI fue el esférico (día 1, RMSE 0.05; día 4, RMSE 0.05; día 9, RMSE, 0.05).

Tabla 13. Parámetros del semivariograma del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para cada día del periodo seco en el campo deportivo del Estadio Nacional.

Propiedad	Día	Grilla	Tamaño de muestra	Nugget	Range	Partial sill	Lag size	Numero de Lags	Nugget to Sill ratio %	Dependencia espacial	Tipo de modelo	RMSE	
Estadio Nacional													
θ_v	1	5.0 m x 10 m	198	16.270	35.430	7.090	7.5	8	69.6	Moderado	Exponencial	4.48	
	%	4	5.0 m x 10 m	198	9.930	25.300	13.540	7.5	8	42.3	Moderado	Exponencial	4.11
		9	5.0 m x 10 m	198	18.750	53.000	6.440	7.5	8	74.4	Moderado	Exponencial	4.67
RP	1	5.0 m x 10 m	198	0.150	23.210	0.710	7.5	8	17.4	Fuerte	Exponencial	0.77	
Mpa	4	5.0 m x 10 m	198	0.089	16.430	0.570	7.5	8	13.5	Fuerte	Exponencial	0.68	
	9	5.0 m x 10 m	198	0.350	34.230	0.730	7.5	8	32.4	Moderado	Exponencial	0.84	
NDVI	1	5.0 m x 10 m	198	0.003	60.000	0.001	7.5	8	83.8	Débil	Esférico	0.06	
	4	5.0 m x 10 m	198	0.002	47.000	0.001	7.5	8	65.5	Moderado	Esférico	0.05	
	9	5.0 m x 10 m	198	0.003	39.640	0.002	7.5	8	57.7	Moderado	Esférico	0.06	
UNALM													
θ_v	1	3.0 m x 3.0 m	128	1.360	27.00	4.70	3	9	22.4	Fuerte	Exponencial	1.81	

%	5	3.0 m x 3.0 m	128	1.430	26.19	4.67	3	9	23.4	Fuerte	Exponencial	1.76
	8	3.0 m x 3.0 m	128	2.290	27.00	4.37	3	9	34.4	Moderado	Exponencial	2.02
RP	1	3.0 m x 3.0 m	128	0.038	19.10	0.03	3	9	58.5	Moderado	Exponencial	0.24
Mpa	5	3.0 m x 3.0 m	128	0.000	6.44	0.12	3	9	0.0	Fuerte	Exponencial	0.31
	8	3.0 m x 3.0 m	128	0.119	8.36	0.52	3	9	18.7	Fuerte	Exponencial	0.71
NDVI	1	3.0 m x 3.0 m	128	0.0010	15.07	0.0015	3	9	40.0	Moderado	Esferico	0.05
	5	3.0 m x 3.0 m	128	0.0018	27.00	0.0013	3	9	58.1	Moderado	Esferico	0.05
	8	3.0 m x 3.0 m	128	0.0010	27.00	0.0021	3	9	32.3	Moderado	Esferico	0.05

En el Estadio Nacional y UNALM los semivariogramas del θ_v , RP y NDVI fueron ajustados a los modelos exponencial, exponencial y esférico respectivamente. Los mismos modelos se obtuvieron en la investigación de Straw et al.(2016) donde los parámetros del semivariograma del θ_v para el campo con textura de suelo arenoso franco (grilla 4.8 x 9.6 m) 130 muestras, la pepita fue 19.4, la meseta fue 23.4, el tamaño del lag fue 7.4 y el nombre de bins o lag fue 8, el modelo seleccionado fue exponencial con un RMSE de 4.96 y el modelo de exponencial se ajustó a la RP, y el esférico al NDVI. Sin embargo, Krum et al.(2010) reporto modelos esféricos para los parámetros de θ_v y NDVI. El conocimiento del comportamiento temporal y espacial de la superficie del campo deportivo y de la carga de los deportistas (trafico) permitirá mejorar el mantenimiento , diseño, e ingeniería de estas superficies (Caple 2011). Los mapas espaciales proporcionan la información más detallada de las propiedades superficiales de un campo deportivo, que fácilmente puede ser visualizado para su manejo respectivo a diferencia de obtener valores promedio que no reflejan la variabilidad espacial (Straw et al. 2018)

4.4.2. Mapas de Unidades Específicas de Manejo o “Site-Specific Management Units (SSMUs)” del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), la resistencia a la penetración (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

a. Estadio Nacional

La construcción de las SSMUs del contenido volumétrico del agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para cada día del periodo sin riego se presentan en la tabla 14 y figura 20.

Las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación bajo en el día 1 se ubicaron en el sur – este y centro del área del campo, en los días 4 y 9, la ubicación de las SSMUs fue similares al día 1. El porcentaje de área de las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación bajo fue incrementando del día 1 (26.8% del campo) al día 4 (44.6% del campo), y fue decreciendo del día 4 al día 9 (25.2% del campo).

Las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación moderado en el día 1, día 4 y día 9 se ubicaron dispersos por toda el área del campo. El porcentaje de área de las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación moderado fue decreciendo del día 1 (65.3% del campo) al día 4 (37.3% del campo), y fue incrementando del día 4 al día 9 (63.1 % del campo).

Las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación alto en el día 1, día 4 y día 9 se ubicaron en el norte – oeste y norte – este del área del campo. El porcentaje de área de las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación alto fue incrementando del día 1 (7.9% del campo) al día 4 (18.1% del campo), y fue decreciendo del día 4 al día 9 (11.7 % del campo).

Las SSMUs de la RP con el nivel de clasificación baja en el día 1, día 4 y día 9 se ubicaron en el sur – este y norte – oeste del área del campo. El porcentaje de las SSMUs de la RP con el nivel de clasificación baja fue incrementando del día 1 (57.1% del campo) al día 4 (61.6% del campo), y fue decreciendo del día 4 al día 9 (33.3% del campo).

Las SSMUs de la RP con el nivel de clasificación moderada en el día 1, día 4 y día 9 se ubicaron dispersos por toda el área del campo. El porcentaje de las SSMUs de la RP con el nivel de clasificación moderada fue decreciendo del día 1 (15.3% del campo) al día 4 (11.0% del campo), y fue incrementando del día 4 al día 9 (28.3% del campo).

Las SSMUs de la RP con el nivel de clasificación alta en el día 1, día 4 y día 9 se ubicaron en la parte central del área del campo. El porcentaje de las SSMUs de la RP con el nivel de clasificación alto fue decreciendo del día 1 (27.6% del campo) al día 4 (27.4% del campo); y fue incrementando del día 4 al día 9 (38.4 % del campo).

Las SSMUs del NDVI con el nivel de clasificación bajo en el día 1, día 4 y día 9 se ubicaron en el sur – oeste y norte – oeste del área del campo. El porcentaje de las SSMUs de *NDVI* con el nivel de clasificación bajo fue incrementando del día 1 (8.1% del campo) al día 4 (12.0% del campo); y fue incrementando del día 4 al día 9 (22.1 % del campo).

Las SSMUs del NDVI con el nivel de clasificación moderado en el día 1, día 4 y día 9 se ubicaron dispersos por toda el área del campo. El porcentaje de área de las SSMUs de *NDVI* con el nivel de clasificación moderado fue decreciendo del día 1 (84.1% del campo) al día 4 (74.8% del campo); y fue decreciendo del día 4 al día 9 (41.1 % del campo).

Las SSMUs del NDVI con el nivel de clasificación alto en el día 1, día 4 y día 9 se ubicaron en el norte - oeste, sur – este y norte del área de campo respectivamente. El porcentaje de de las SSMUs de *NDVI* con el nivel de clasificación alto fue incrementando del día 1 (7.8%

del campo) al día 4 (13.2% del campo); y fue incrementando del día 4 al día 9 (36.8% del campo).

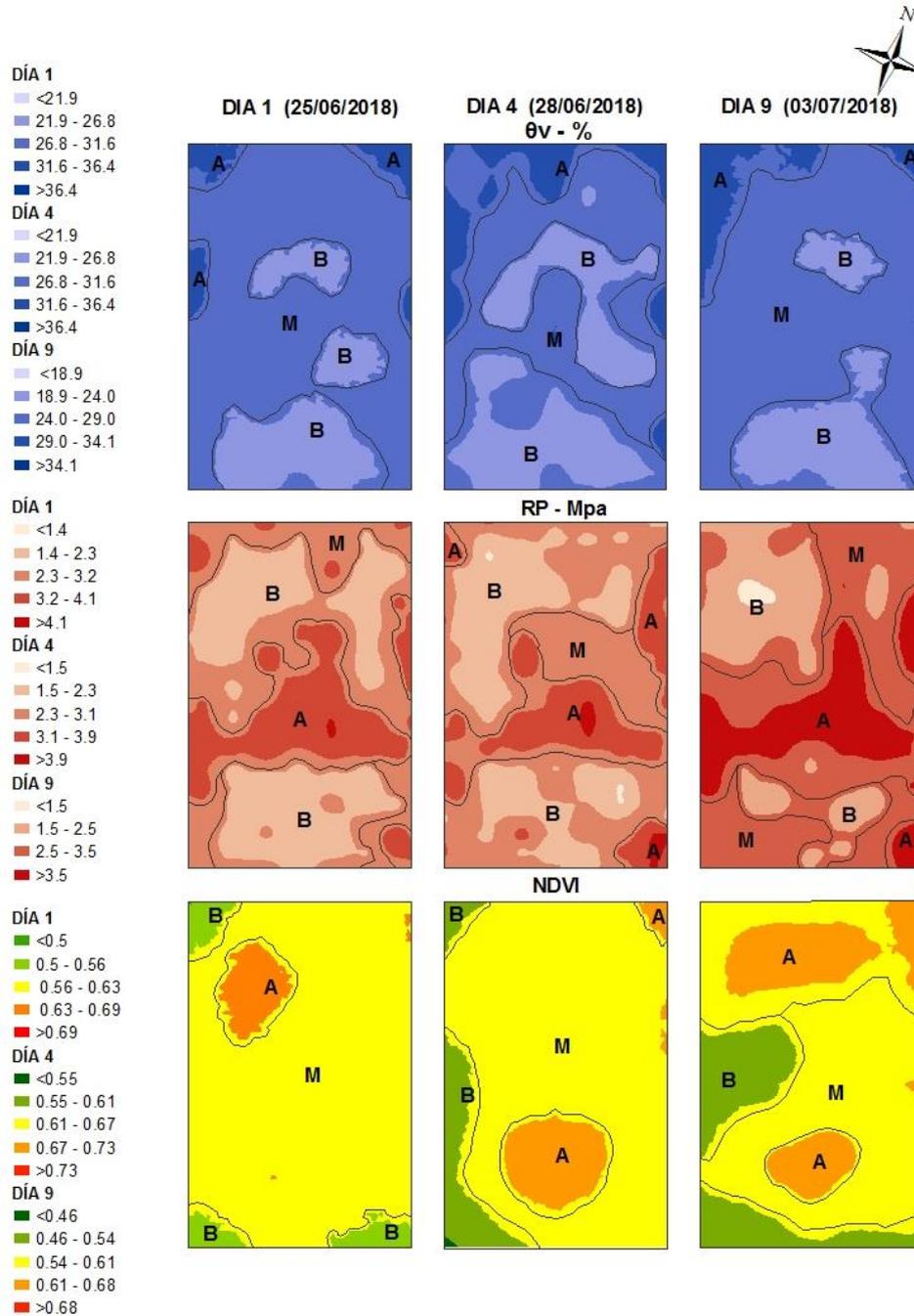


Figura 20. Mapas con las “Site-Specific Management Units (SSMUs)” de acuerdo a la clasificación Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A) para cada día del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para los días 1, 4 y 9 del periodo seco en el campo deportivo del Estadio Nacional.

Tabla 14. Descripción estadística y porcentaje de las “Site-Specific Management Units (SSMUs)” para la gestión del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para cada día del periodo seco en el campo deportivo del Estadio Nacional, la clasificación de las unidades fue Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A)

Propiedad	Día	Nivel	Min	Max	Media	SD	CV%	Área %
Estadio Nacional								
θ_v %	1	Bajo	24.0	28.5	26.2	0.77	2.9	26.8
		Moderado	26.3	31.6	28.9	1.19	4.1	65.3
		Alto	29.4	34.0	31.8	0.60	1.9	7.9
	4	Bajo	22.6	31.6	26.2	1.46	5.6	44.6
		Moderado	25.0	32.3	29.1	1.19	4.1	37.3
		Alto	28.5	35.9	31.9	1.07	3.3	18.1
	9	Bajo	21.4	25.3	23.4	0.67	2.9	25.2
		Moderado	23.6	29.6	26.0	1.14	4.4	63.1
		Alto	27.7	31.1	29.3	0.56	1.9	11.7
RP Mpa	1	Bajo	1.4	3.3	2.2	0.35	16.0	57.1
		Moderado	2.2	3.9	2.8	0.28	10.0	15.3
		Alto	2.3	4.1	3.4	0.34	10.1	27.6
	4	Bajo	1.3	3.7	2.3	0.34	15.0	61.6
		Moderado	2.3	3.1	2.7	0.14	5.2	11.0
		Alto	2.4	4.2	3.2	0.31	9.7	27.4
	9	Bajo	1.4	3.7	2.3	0.40	17.3	33.3
		Moderado	2.2	3.6	3.0	0.25	8.4	28.3
		Alto	2.3	4.2	3.5	0.42	12.1	38.4
NDVI	1	Bajo	0.496	0.603	0.550	0.006	1.1	8.1
		Moderado	0.558	0.635	0.600	0.012	2.0	84.1
		Alto	0.610	0.646	0.660	0.015	2.3	7.8
	4	Bajo	0.530	0.630	0.598	0.017	2.8	12.0
		Moderado	0.610	0.670	0.649	0.011	1.7	74.8
		Alto	0.658	0.695	0.678	0.009	1.3	13.2
	9	Bajo	0.465	0.566	0.522	0.021	4.0	22.1
		Moderado	0.541	0.613	0.578	0.014	2.4	41.1
		Alto	0.550	0.656	0.608	0.018	3.0	36.8

b. UNALM

La construcción de las SSMUs del contenido volumétrico del agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para cada día del periodo seco en el área verde en estudio de la UNALM se muestran en la tabla 15 y figura 21.

Las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación bajo en el día 1 se ubicaron en el norte - oeste y sur - este del área del jardín, en los días 4 y 9 la ubicación de las unidades fue similares al día 1. El porcentaje de área de las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación bajo fue decreciendo del día 1 (30.5% del campo) al día 5 (40.3% del campo) al día 8 (22.8% del campo).

Las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación moderado en el día 1, día 5 y día 8 se ubicaron dispersos por toda el área del jardín. El porcentaje de área de las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación moderado fue incrementando del día 1 (25.9% del campo) al día 5 (19.0% del campo) al día 8 (47.2 % del campo).

Las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación alto en el día 1, día 5 y día 8 se ubicaron en el norte - este y sur - oeste del área del jardín. El porcentaje de área de las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación alto fue decreciendo del día 1 (43.6% del campo) al día 5 (40.7% del campo) al día 8 (30.0% del campo).

Las SSMUs de la RP con el nivel de clasificación baja en el día 1 estuvieron en el sur - este y norte - oeste, día 5 se ubicaron en el sur - oeste y norte - este y día 8 estuvieron dispersos por toda el área del jardín. El porcentaje de área de las SSMUs de RP con el nivel de clasificación bajo fue incrementando del día 1 (28.2% del campo) al día 4 (34.6% del campo) al día 9 (54.8 % del campo).

Las SSMUs de la RP con el nivel de clasificación moderada en el día 1, día 5, día 8 se ubicaron dispersos por toda el área del jardín. El porcentaje de área de las SSMUs de RP con el nivel de clasificación moderado fue decreciendo del día 1 (49.6% del campo) al día 4 (29.7% del campo).

Las SSMUs de la RP con el nivel de clasificación alta en el día 1 se ubicaron en el norte - oeste, y día 5 y día 8 estuvieron por el sur - este el área del jardín. El porcentaje de área de las unidades de baja RP fue incrementando del día 1 (22.2% del campo) al día 4 (35.5% del campo) del día 8 (45.0% del campo).

Las SSMUs de NDVI con el nivel de clasificación bajo en el día 1, día 5 y día 8 se ubicaron en el norte – oeste del área del jardín. El porcentaje de área de las SSMUs de NDVI con el nivel de clasificación bajo fue decreciendo del día 1 (19.5% del campo) al día 4 (7.2% del campo); y fue incrementando del día 5 al día 8 (17.6 % del campo).

Las SSMUs de NDVI con el nivel de clasificación moderado en el día 1, día 4 y día 9 se ubicaron dispersos por toda el área del jardín. El porcentaje de las SSMUs de *NDVI* con el nivel de clasificación moderado fue incrementando del día 1 (53.3% del campo) al día 5 (74.4% del campo); y fue decreciendo del día 5 al día 8 (62.3 % del campo).

Las SSMUs de NDVI con el nivel de clasificación alto en el día 1 se ubicaron en el sur – oeste y, centro y este, día 5 y día 8 estuvieron en el sur – oeste del área del jardín. El porcentaje de las SSMUs de *NDVI* con el nivel de clasificación alto fue decreciendo del día 1 (27.2% del campo) al día 4 (19.0% del campo); y fue incrementando del día 5 al día 8 (20.0% del campo).

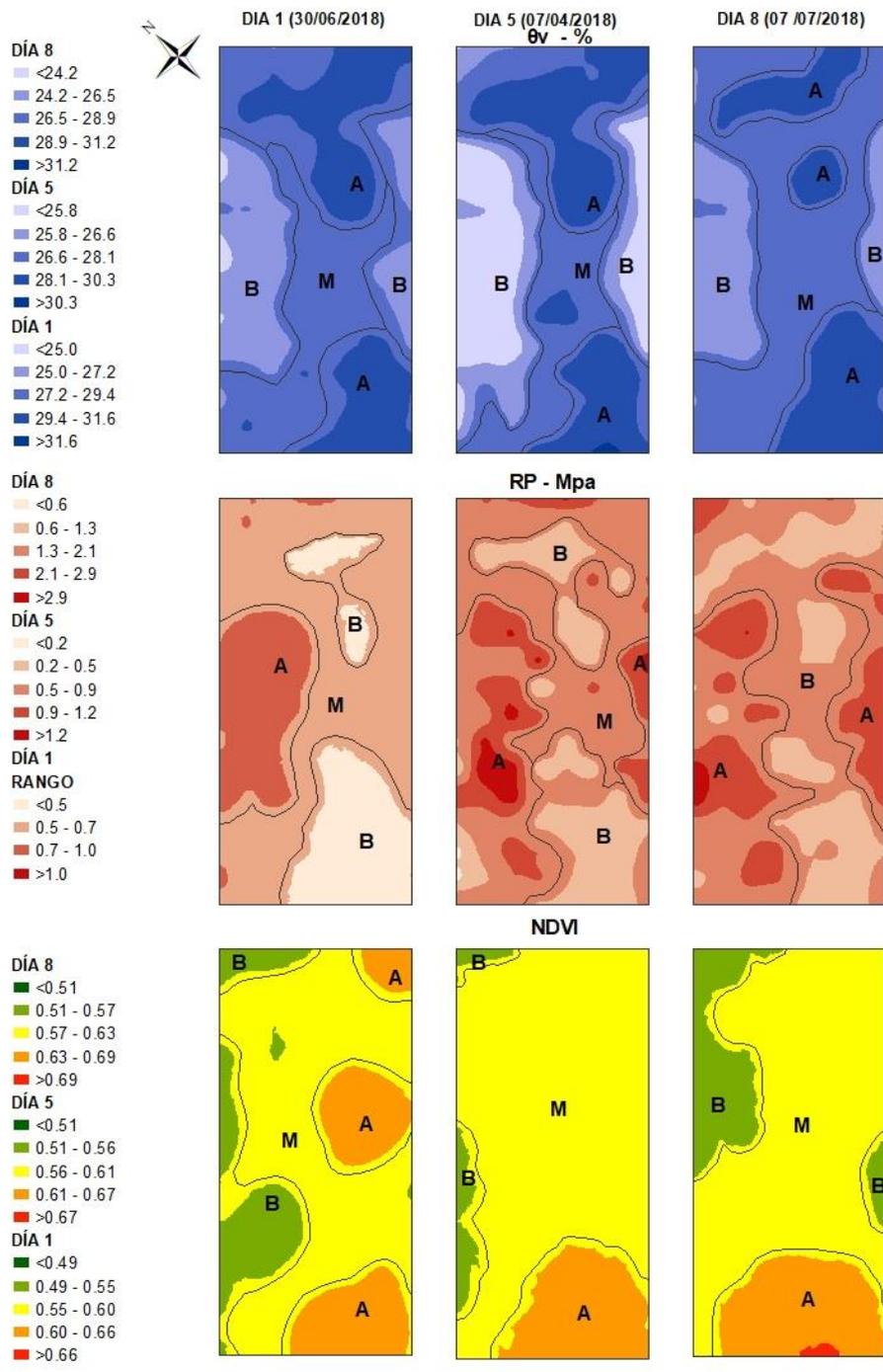


Figura 21. Mapas con las “Site-Specific Management Units (SSMUs)” de acuerdo a la clasificación Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A) para cada día del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para los días 1, 5 y 8 del periodo seco en el área verde urbana en estudio de la UNALM.

Tabla 15. Descripción estadística y porcentaje de las “Site-Specific Management Units (SSMUs)” para la gestión del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para cada día del periodo seco en la UNALM, la clasificación de las unidades fue Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A)

Propiedad	Día	Nivel	Min	Max	Media	SD	CV%	Área %
Área verde urbana - UNALM								
θ_v %	1	Bajo	24.3	28.6	26.7	0.8	3.0	30.5
		Moderado	26.4	29.8	28.5	0.5	1.7	25.9
		Alto	27.1	31.5	29.5	0.8	2.7	43.6
	5	Bajo	23.2	27.8	25.7	0.9	3.4	40.3
		Moderado	26.7	28.5	27.4	0.4	1.4	19.0
		Alto	25.7	30.4	28.3	0.7	2.6	40.7
	8	Bajo	24.8	27.2	26.0	0.6	2.2	22.8
		Moderado	26.2	28.9	27.8	0.5	1.9	47.2
		Alto	26.6	31.1	29.4	0.6	2.2	30.0
RP Mpa	1	Bajo	0.4	0.6	0.5	0.033	6.9	28.2
		Moderado	0.5	0.8	0.6	0.048	8.3	49.6
		Alto	0.6	0.9	0.8	0.063	8.2	22.2
	5	Bajo	0.2	1.1	0.5	0.104	21.7	34.6
		Moderado	0.1	1.3	0.7	0.108	15.0	29.7
		Alto	0.1	1.6	0.9	0.220	25.3	35.5
	8	Bajo	0.5	2.7	1.4	0.304	21.7	54.8
		Alto	0.6	3.8	2.1	0.369	17.9	45.0
	NDVI	1	Bajo	0.50	0.56	0.5	0.010	1.8
Moderado			0.55	0.60	0.6	0.011	2.0	53.3
Alto			0.59	0.65	0.6	0.015	2.4	27.2
5		Bajo	0.54	0.57	0.6	0.005	0.9	7.2
		Moderado	0.56	0.61	0.6	0.010	1.8	74.4
		Alto	0.60	0.64	0.6	0.010	1.6	19.0
8		Bajo	0.51	0.58	0.6	0.012	2.1	17.6
		Moderado	0.57	0.62	0.6	0.014	2.3	62.3
		Alto	0.62	0.70	0.6	0.018	2.7	20.0

La agricultura de precisión en áreas verdes o “Precision Turfgrass Management” (PTM), es un nuevo concepto que se viene aplicando para el manejo de áreas verdes urbanas en el Perú. La PTM enfoca en mejorar la eficiencia y las decisiones de manejo a través de la aplicación de insumos tales como agua, fertilizantes y semillas, permite conocer donde, cuando y la cantidad que necesita la planta. PTM fue desarrollado y basado en premisas de manejo específico del campo, el cual requiere información detallada de sitio a través de un muestreo

intenso (Krum et al. 2010, Carrow et al. 2010). El conocimiento sobre la distribución espacial se puede utilizar para opciones de gestión de desarrollo que minimicen los riesgos de producción y el impacto nocivo del tráfico en el campo (Barik et al. 2014)

SSMUs son fundamentales para la implementación del PTM. Las variaciones espacio temporales a corto plazo de la compactación de suelo y NDVI de césped pueden ser dinámicos durante un periodo sin riego en campos deportivos de césped natural (Straw y Henry 2018).

Antes de usar las SSMU para la aireación específica del sitio, se debe determinar que los valores de resistencia a la penetración sean razonables. Si las SSMU de resistencia de penetración baja o alta superan un cierto umbral, se puede iniciar con el manejo del campo en forma integral. Un límite de resistencia a la penetración dentro de las SSMUs es 3.99 MPa, el cual fue propuesto por Flitcroft et al. (2010) para determinar la implementación de la aireación específica del sitio en áreas muy compactadas en un campo de golf. Conforme a esta recomendación, el SSMUs de RP con el nivel de clasificación alto en el Estadio Nacional excedió el límite de 3,99 MPa en cada día de periodo sin riego y sería necesario una aireación en esas unidades. No existen umbrales para iniciar la aireación específica en los campos deportivos. Además, se debe considerar la humedad del suelo en el momento del muestreo, debido a la resistencia de penetración puede estar por debajo de los umbrales cuando el campo está cerca de la capacidad del campo y por encima de los umbrales cuando el campo está seco (Straw y Henry 2018).

Las SSMUs sirve para definir los límites de las áreas con condiciones diferentes, el mapeo del campo después de un evento de riego nos indicara que áreas necesitan ser manejadas a detalle. El riego complementario mediante acople rápido y manguera será necesario aplicar a las SSMUs del θ_v con el nivel de clasificación bajo.

Una cantidad de variables internas (textura del suelo, raíces, contenido de agua del suelo, densidad del suelo y materiales para la estabilidad de suelo y césped) y externas (condiciones climáticas, manejo, tráfico y pisoteo) pueden contribuir al comportamiento mecánico de los campos deportivos (Cagle 2011). El estudio proporciona datos de referencia importantes sobre el comportamiento del contenido volumétrico de agua del suelo resistencia a la penetración, NDVI y volúmenes de agua aplicados por el sistema de riego.

Las prácticas culturales como el riego, la aireación y la fertilización, a menudo son llevadas a cabo por los gerentes de campo deportivo para mitigar las tensiones del tráfico peatonal. Típicamente, estas prácticas culturales se aplican homogéneamente; sin embargo, la variabilidad dentro del campo de parámetros como la compactación del suelo y el vigor del césped puede ser dinámico debido a las interacciones entre el uso y manejo del campo, clima, planta y factores del suelo (Carrow et al. 2010, Flitcroft et al. 2010, Caple et al. 2012, Straw et al. 2016).

4.4.3. Aplicaciones prácticas de la agricultura de precisión en áreas verdes urbanas utilizando las Site-Specific Management Units (SSMUs)

a. Site-Specific Management Units (SSMUs) del volumen de agua en los colectores (VAC)

En el Estadio Nacional, los mapas de las SSMUs, correspondientes al VAC mostraron que la mayor extensión del campo se encontraba con el nivel de clasificación “bajo” en las fechas 4 de junio y 17 de septiembre del 2018, el 67.7% y 65.2% del área total del campo (Figura 22a y Tabla 16). El nivel “bajo” de volumen de agua en colectores se debe a que la presión de 60 m.c.a no es la presión de trabajo adecuada de los cañones. Según la ficha técnica se recomienda una presión de trabajo debe ser de 80 m.c.a. Una inadecuada presión de trabajo produce un déficit de volúmenes de riego en el campo y deficientes traslapes de riego. En la investigación de Dukes et al. (2006) se reportó que la presión de trabajo del aspersor influye en la uniformidad de riego, es decir a menor presión de trabajo se obtiene valores menores en la DU en base a colectores y humedad de suelo, por ejemplo, a la presión de 41.4 m.c.a, 13.8 m.c.a y 6.9 m.c.a se obtuvo 63.0%, 55.0% y 39.0% la DU en base a colectores.

En la UNALM, los mapas de SSMUs en base al VAC, mostraron que la mayor extensión del campo se encontraba con el nivel de clasificación “moderado” en las fechas del 19 de mayo y 26 de mayo del 2018 un porcentaje de 85.0% y 90.0% del área total de campo (Figura 23a y Tabla 16). El porcentaje de nivel de clasificación “bajo” para ambas fechas fue menor al 9.0%, lo cual no fue significativo, pero podría atribuirse a la presencia de postes en los extremos del área que intercepta la lluvia generada por los aspersores.

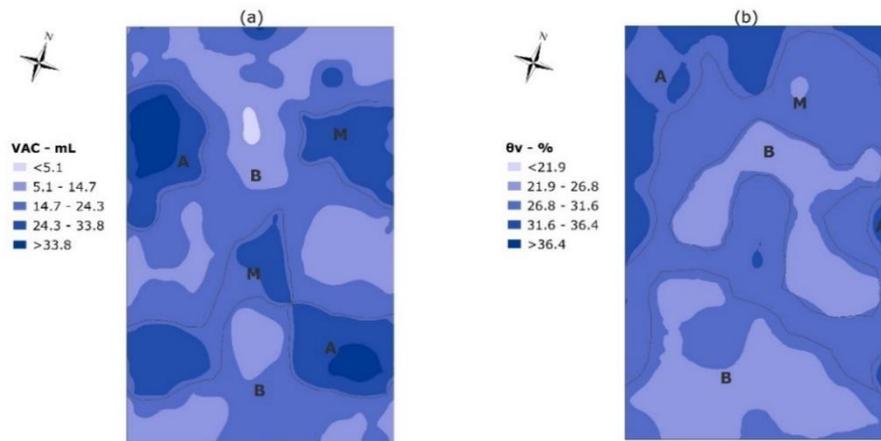


Figura 22: (a) Estadio Nacional grillado Estadio Nacional, (a) y (b) mapas de la variabilidad espacial del volumen de agua en los colectores (VAC) correspondiente al 04/06/2018 y del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) correspondiente al 28/06/2018; y Site-Specific Management Units de acuerdo a la clasificación: Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).

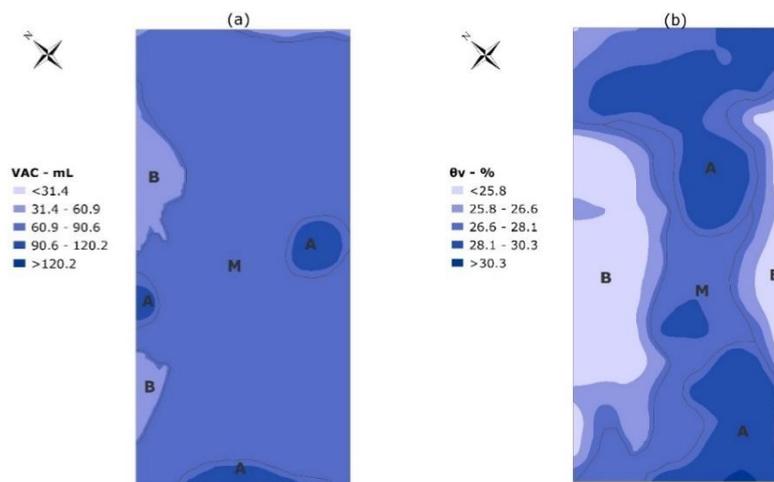


Figura 23: UNALM, (a) y (b) mapas de la variabilidad espacial del volumen de agua en los colectores (VAC) correspondiente al 19/05/2018 y del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) correspondiente al 07/04/2018; y Site-Specific Management Units de acuerdo a la clasificación: Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).

b. Site-Specific Management Units (SSMUs) del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v)

En el Estadio Nacional, los mapas de las SSMUs, correspondientes al θ_v mostraron que la mayor extensión del campo se encontraba con el nivel de clasificación “bajo” (44.6%) y “moderado” (63.1%) en las fechas 28 de junio y 3 de julio del 2018 (Figura 22b y Tabla 16).

En la UNALM, los mapas de SSMUs en base al θ_v , mostraron que la mayor extensión del campo se encontraba con el nivel “alto” (40.7%) y “moderado” (47.2%) en las fechas del 4 de julio y 7 de julio del 2018 (Figura 23b y Tabla 16). Las SSMUs del θ_v con el nivel bajo de humedad de suelo podría ser debido a la compactación del suelo.

En el Estadio Nacional y UNALM la correlación que existe entre el θ_v y la RP es negativa por lo tanto la uniformidad de la distribución de humedad en el suelo de las SSMUs del θ_v , podría mejorar a través de la aireación en las unidades con un nivel de compactación alta para reducir el grado de compactación y mejorar la infiltración del agua (Straw y Henry 2018, Straw et al. 2017). La SSMUs del θ_v podría ser útil para mejorar la programación de riego, es decir aplicar el valor de SM a cada unidad específica de manejo (Krum et al. 2010). Además, la SSMUs del θ_v podría ser servir para ubicar los aspersores que estén funcionando incorrectamente y realizar el mantenimiento de estos aspersores (Straw y Henry 2018).

Tabla 16. Porcentaje de área de las SSMUs del volumen de agua en colectores (VAC) y el contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) en el Nacional y la UNALM, la clasificación de las unidades fue Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).

Variable	Día	Nivel	Min. (%)(mL) †	Max. (%)(mL) †	Media (%)(mL) †	SD	CV %	Área %
Estadio nacional								
VAC	04/06/2018	Bajo	1,8	39,4	15,6	4,16	26,7	67,7
		Moderado	15,3	35,2	25,4	3,28	12,9	16,7
		Alto	16,9	45,9	30,7	5,17	16,8	15,6
	17/09/2018	Bajo	4,0	29,8	15,5	3,44	22,3	65,2
		Moderado	17,5	36,7	24,7	2,82	11,4	9,2
		Alto	9,6	44,4	24,9	4,91	19,7	25,6
θ_v	28/06/2018	Bajo	22,6	31,6	26,2	1,46	5,6	44,6
		Moderado	25,0	32,3	29,1	1,19	4,1	37,3
		Alto	28,5	35,9	31,9	1,07	3,3	18,1
	03/07/2018	Bajo	21,4	25,3	23,4	0,67	2,9	25,2
		Moderado	23,6	29,6	26,0	1,14	4,4	63,1
		Alto	27,7	31,1	29,3	0,56	1,9	11,7
UNALM								
VAC	19/05/2018	Bajo	45,1	66,8	58,1	3,97	6,8	8,0
		Moderado	58,2	91,4	77,2	6,72	8,7	85,1
		Alto	72,8	116,8	93,2	5,82	6,2	6,9
	26/05/2018	Bajo	43,1	64,6	56,2	4,13	7,3	4,8
		Moderado	58,4	95,6	75,7	6,93	9,1	90,8
		Alto	83,1	131,8	97,2	6,89	7,1	4,4
θ_v	04/07/2018	Bajo	23,2	27,8	25,7	0,88	3,4	40,3
		Moderado	26,7	28,5	27,4	0,37	1,4	19,0
		Alto	25,7	30,4	28,3	0,74	2,6	40,7
	07/07/2018	Bajo	24,8	27,2	26,0	0,56	2,2	22,8
		Moderado	26,2	29,8	27,8	0,52	1,9	47,2
		Alto	26,6	31,1	29,4	0,64	2,2	30,0

† θ_v es medido en porcentaje; VAC es medido en mililitros.

c. Site-Specific Management Units (SSMUs) de la resistencia a la penetración (RP)

En el Estadio Nacional, la SSMUs de la RP con el nivel de clasificación “bajo” ocupó la mayor extensión (61.6%), ver Figura 24a. La RP de nivel “alto” presenta el valor mínimo de 2.4 Mpa y máximo de 4.2 Mpa (Tabla 17). Las SSMUs de la RP nos permiten identificar las áreas específicas donde se debe aplicar la práctica cultural de aerificación. Flitcroft et al. (2010) elaboró mapas de la resistencia a la penetración en un campo de golf y reportó que cuando se obtengan mapas de SSMUs con valores de RP que exceden los 3.99 Mpa, se debería iniciar la aerificación en el campo de golf. Straw & Henry (2018) aplicaron la

recomendación de Flitcroft et al. (2010) en la investigación de variación espacio temporal de las SSMUs de la RP en campos de fútbol, además Straw y Henry recomiendan que antes de iniciar la práctica de aerificación, se debe verificar primero que las SSMUs bajas y altas tengan un nivel razonable de resistencia a la penetración (Straw y Henry 2018), debido a las investigaciones expuestas, en el Estadio Nacional solo se debe airear en la SSMUs de nivel alto, esta unidad fue ubicada en el centro del campo, sur – este y norte – este del campo.

En la UNALM, la SSMUs correspondiente a la RP, con el nivel de clasificación “alto” ocupó la mayor extensión (74.8%), ver Figura 25a. Respecto a la SSMUs de nivel de clasificación “alto” presenta en valor mínimo de 0,1 Mpa y máximo de 1.6 Mpa (Tabla 17), considerando que todas las SSMUs de la RP están por debajo de 3,99 Mpa, no sería necesario realizar la aerificación de las SSMUs de la RP.

d. Site-Specific Management Units (SSMUs) del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

En el Estadio Nacional, la SSMUs correspondiente al NDVI mostro que la mayor extensión del campo (74,8%) presento un nivel de clasificación “moderado”, ver Figura 24b; el valor mínimo y máximo de NDVI de este nivel fue 0,61 y 0,67 respectivamente (Tabla 17). El NDVI es un índice que tiene un rango de 0 a 1, donde el alto valor indica que la cobertura verde de la planta está sana y densa, además las plantas sanas son caracterizadas por un alto valor en banda cercana al infrarrojo (NIR) y bajo en la banda roja (R) (Krum et al. 2010). Según los resultados obtenidos en el nivel “moderado” del área del campo deportivo presentó un NDVI promedio de 0,65; este valor nos indica que el césped presenta una calidad aceptable, esto podría ser porque la medición de este parámetro fue en la estación de invierno donde se aprecia la disminución de horas sol y el césped no tiene la suficiente luz para su desarrollo. La calidad de césped es relacionada con el NDVI, el coeficiente de determinación entre la calidad de césped y NDVI para los céspedes de estación cálida es de 0,65 (Leinauer et al. 2014).

En la UNALM, la SSMUs correspondiente al NDVI mostro que la mayor extensión del campo (74,4 %) tenía el nivel de clasificación “moderado”, ver Figura 25b; el valor mínimo y máximo de NDVI de este nivel fue 0,56 y 0,61 respectivamente (Tabla 17). Según los resultados obtenidos en el nivel “moderado” del área verde presento un NDVI promedio de 0,59; este valor nos indica que el césped presenta una calidad aceptable. Las SSMUs de nivel

bajo del θ_v y NDVI nos permite identificar áreas para tomar acciones en la programación de riego y calidad de césped (Krum et al. 2010).

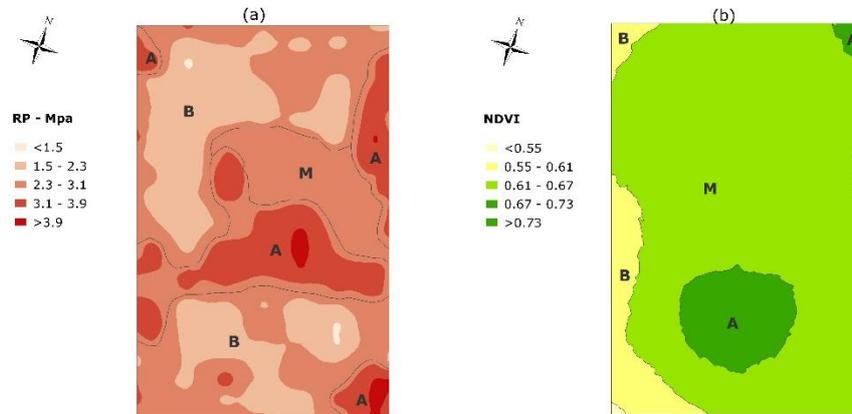


Figura 24: Estadio Nacional, (a) y (b) mapas de la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración (RP) correspondiente al 28/06/2018 e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente al 28/06/2018; y mapas de Site-Specific Management Units de acuerdo a la clasificación Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A)

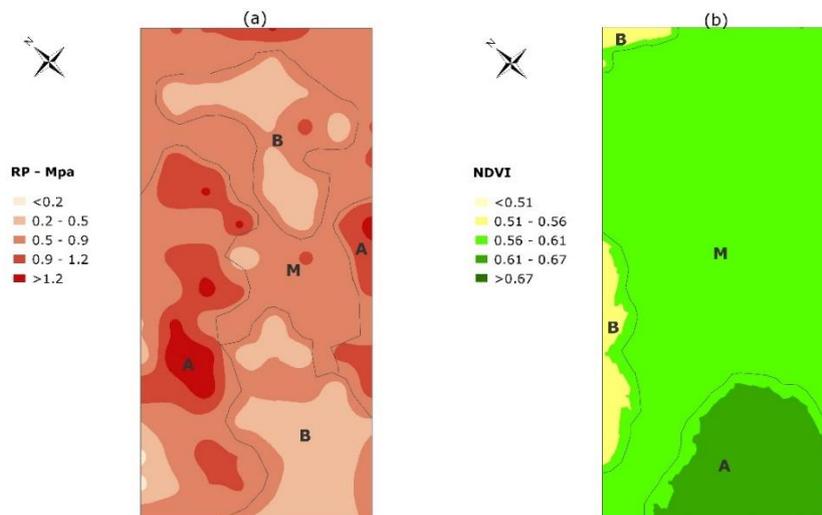


Figura 25: UNALM, (a) y (b) mapas de la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración (RP) correspondiente al 07/04/2018 e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente al 07/04/2018; y mapas de Site-Specific Management Units acuerdo a la clasificación Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).

Tabla 17. Porcentaje de área de las SSMUs de la resistencia a la penetración (RP) e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el Estadio Nacional y la UNALM, la clasificación de las unidades fue Bajo (B), Moderado (M) y Alto (A).

Variable	Nivel	Min. (Mpa) †	Max. (Mpa) †	Media (Mpa) †	SD	CV %	Área %
Estadio Nacional							
RP	Bajo	1,30	3,70	2,30	0,340	15,0	61,6
	Moderado	2,30	3,10	2,70	0,140	5,2	11,0
	Alto	2,40	4,20	3,20	0,310	9,7	27,4
NDVI	Bajo	0,53	0,63	0,60	0,017	2,8	12,0
	Moderado	0,61	0,67	0,65	0,011	1,7	74,8
	Alto	0,66	0,70	0,68	0,009	1,3	13,2
UNALM							
RP	Bajo	0,20	1,10	0,50	0,104	21,7	34,6
	Moderado	0,10	1,30	0,70	0,108	15,0	29,7
	Alto	0,10	1,60	0,90	0,220	25,3	35,5
NDVI	Bajo	0,54	0,57	0,56	0,005	0,9	7,2
	Moderado	0,56	0,61	0,59	0,010	1,8	74,4
	Alto	0,60	0,64	0,62	0,010	1,6	19,0

† RP es medido en Mpa; NDVI es una medida sin unidades.

4.4.4. Efecto del volumen de agua en los colectores (VAC), la resistencia a la penetración (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) sobre el contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v)

Para conocer el efecto del VAC, la RP y el NDVI sobre el θ_v , se realizó una regresión lineal múltiple. En el Estadio Nacional y la UNALM, el VAC no fue significativo al predecir el θ_v . Asimismo, los mapas del θ_v y el VAC (Figura 22 y 23) demuestran que no existe relación entre la variabilidad espacial entre ambas variables; este resultado concuerda con lo mencionado por Straw et al. (2018) que indica que la variabilidad espacial de los volúmenes de agua de riego no es reflejada en la variabilidad espacial de la humedad de suelo. Esto podría ser a las mediciones de DU basadas en el θ_v fueron realizadas 24 horas después del riego, cuando el agua fue redistribuida en el perfil del suelo; este proceso incrementa el valor de DU en base a humedad; no obstante, el suelo presenta heterogeneidad espacial y temporal en sus propiedades causada por una serie de factores y procesos (Pinzón et al. 2016).

a. Estadio Nacional

La regresión lineal múltiple demostró que en el Estadio Nacional solo la RP fue significativa ($p < 0.0001$) al predecir el θ_v , (Tabla 19). Las investigaciones de Caple et al.; Straw & Henry (2012, 2018) reportaron una negativa correlación entre el θ_v y la RP, por ejemplo

Straw & Henry reportó que la correlación entre la RP y el θ_v fue significativa ($P < 0.001$) los días de medición 1 y 4 ($r = -0.72$, $r = -0.77$) y moderada en el día 11 ($r = -0.45$), en un campo de fútbol donde la textura de suelo fue franco arenoso. La compactación de suelo en campos deportivos es inevitable debido al tráfico peatonal, esto causa la reducción de la infiltración del agua de riego y conduce al incremento de evaporación y escorrentía (Arrieta et al. 2009).

En el Estadio Nacional predomina el césped bermuda y no se evidenció en las pruebas estadísticas significancia en el NDVI, al predecir el θ_v ; esto podría concordar con la investigación de Xiong (2001) donde encontró que el agua del suelo no fue un factor importante que afecte el NDVI ($r^2 = 0.03$, $p < 0.001$, $n = 1475$), el NDVI podría usarse como un indicador del estado de la planta y la necesidad de nitrógeno independientemente del tratamiento de riego (Xiong et al. 2007). Además, Straw & Henry (2018) obtuvo valores no significativos de correlación entre el NDVI y el θ_v ($r = 0.12$, 0.08 y 0.14 , en el día 1, día 5 y día 8 respectivamente) en uno de los campos evaluados de textura de suelo arenosa.

Tabla 18. Modelo de regresión lineal múltiple para el Estadio Nacional y la UNALM para predecir el contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) en base al volumen de agua en los colectores (VAC), la resistencia a la penetración (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Locación	Variable	Coefficiente estimado	Error estándar	t	p - value	95% I.C
Estadio Nacional	Intercepto	35.706	3.987	8.95	< 0.0001 **	27.84 a 43.57
	RP	-1.558	0.414	-3.76	< 0.0001 **	-2.37 a -0.74
	NDVI	-6.771	5.737	-1.18	0.239	-18.08 a 4.54
	VAC	0.056	0.037	1.51	0.133	-0.01 a 0.13
UNALM	Intercepto	25.144	1.978	12.71	< 0.0001 **	21.23 a 29.06
	RP	-3.184	0.373	-8.52	< 0.0001 **	-3.92 a -2.44
	NDVI	10.221	3.441	2.97	0.004 *	3.41 a 17.03
	VAC	-0.004	0.007	-0.69	0.49	-0.01 a 0.009

*, ** nivel de significancia a 0.01 y 0.0001 nivel de probabilidad, respectivamente.

b. UNALM

La regresión lineal múltiple demostró que la resistencia a la penetración y el NDVI fueron significativos al predecir el θ_v ($p < 0.0001$ y $p < 0.01$). Según Straw et al. (2018) reportó que el suelo con textura franco arenosa, la RP y el NDVI fueron significativos ($p < 0.001$ y

$p < 0.01$ respectivamente) al predecir el θ_v , lo cual concuerda con los resultados la investigación.

Además, Straw & Henry (2018) reportaron que la correlación fue débil entre el NDVI y el θ_v [$r=0.15$, 0.07 ($P<0.001$) y 0.34 ($P<0.05$) en el día 1, día 4 y día 11 respectivamente]. La correlación débil entre el NDVI y el θ_v a capacidad de campo probablemente se deba a los efectos residuales del estado de humedad del suelo en el pasado en lugar del valor de la capacidad de campo en el mapeo (Krum et al. 2010). Estos resultados son similares a la presente investigación.

4.5. Coeficiente de correlación entre el contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), la resistencia a la penetración (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El análisis de los coeficientes de correlación de Pearson se realizó con el software STATA 14, para los parámetros de θ_v , RP del suelo y NDVI de césped, a un nivel de significancia ($P < 0.005$) ver tabla 19.

En el Estadio Nacional, el coeficiente de correlación entre el θ_v y RP del suelo fue negativo débil y los coeficientes fueron $r= -0.15$, $r=-0.22$ y $r=-0.29$ en días 1, 4 y 9 respectivamente. El coeficiente de correlación entre el θ_v y NDVI fue positivo débil para el día 1 y negativo débil y los coeficientes fueron $r= 0.06$, $r=-0.04$ y $r=-0.003$ en días 1, 4 y 9 respectivamente. El coeficiente de correlación entre RP del suelo y NDVI fue negativo débil y los coeficientes fueron $r= -0.20$, $r=-0.27$ y $r=-0.19$ en días 1, 4 y 9 respectivamente.

En la UNALM, el coeficiente de correlación entre el θ_v y RP del suelo fue negativo débil y los coeficientes fueron $r= -0.51$, $r=-0.47$ y $r=-0.46$ en días 1, 5 y 8 respectivamente. El coeficiente de correlación entre el θ_v y NDVI fue positivo media y coeficientes fueron $r= 0.51$, $r=0.48$ y $r=0.59$ en días 1, 5 y 8 respectivamente. El coeficiente de correlación entre RP del suelo y NDVI fue negativo y los coeficientes ($r= -0.30$, $r=-0.11$ y $r=-0.37$ en días 1, 5 y 8 respectivamente).

Según Straw y Henry (2018) reportaron que la correlación entre θ_v y NDVI fue generalmente débil ($r=0.15$, $r=0.07$ y $r=0.34$) para los días 1,4 y 11. Para el campo de suelo

textura arenoso ($r = 0.12$, $r = 0.08$ y $r = 0.14$) para los días 1,5 y 8. La correlación entre RP y NDVI fue negativa para el campo de suelo franco arenoso ($r = -0.25$, $r = -0.17$ y $r = -0.39$) y para suelo arenoso ($r = -0.25$, $r = -0.45$ y $r = -0.30$). Finalmente, Straw y Henry (2018) concluyeron que la relación entre la compactación y la humedad de suelo es negativa, la humedad de suelo y NDVI decrecen mientras la magnitud de resistencia a la penetración aumenta. En el Estadio Nacional, los coeficientes de correlación entre θ_v y NDVI; RP y NDVI fueron débil, estos resultados son similares a la investigación de Straw y Henry.

Tabla 19. Correlación de Pearson del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), resistencia a la penetración del suelo (RP) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para cada día del periodo seco en el campo deportivo del Estadio Nacional y área de estudio de la UNALM.

Estadio Nacional				
Día	Propiedad	θ_v	RP	NDVI
1	θ_v	1.000	-0.152	0.061
	RP		1.000	-0.202
	NDVI			1.000
4	θ_v	1.000	-0.222	-0.041
	RP		1.000	-0.274
	NDVI			1.000
9	θ_v	1.000	-0.287	-0.190
	RP			-0.003
	NDVI			1.000
Área verde urbana - UNALM				
Día	Propiedad	θ_v	RP	NDVI
1	θ_v	1.000	-0.513	0.512
	RP		1.000	-0.301
	NDVI			1.000
5	θ_v	1.000	-0.472	0.484
	RP		1.000	-0.109
	NDVI			1.000
8	θ_v	1.000	-0.459	0.589
	RP		1.000	-0.367
	NDVI			1.000

V. CONCLUSIONES

1. Los valores de las DU_{lq} obtenidos en base al contenido volumétrico de agua del suelo fueron mayores a los DU_{lq} en base al volumen de agua en los colectores; es necesario realizar las dos pruebas, considerando que la primera refleja la calidad del diseño, operación y mantenimiento del sistema de riego y la segunda refleja la redistribución de la humedad en el perfil del suelo en beneficio del césped, ambas pruebas contribuyen a toma de decisiones para el mejor manejo del riego en el campo.
2. El uso de los mapas de las SSMUs del VAC, el θ_v , la RP, el NDVI son una aplicación práctica de la agricultura de precisión en áreas verdes, los cuales proporcionan información específica del campo que permite tomar decisiones en el manejo, como la corrección de las deficiencias del sistema de riego en la distribución del agua, la identificación de áreas que requieran aireación del suelo, visualización de la calidad de césped, aplicación de riegos suplementarios e implementación de estrategias que permitan mejorar la uniformidad de distribución de riego.
3. Según las correlaciones lineales, en el Estadio Nacional, suelo de textura arenoso franco, la correlación entre la RP y el θ_v fue negativa, es decir a medida que el θ_v suelo decrece la RP aumenta. En la UNALM, textura franco arenoso, la correlación entre la RP y el θ_v fue negativo, y la correlación entre el NDVI y el θ_v fue positivo, es decir el θ_v y el NDVI decrece a medida que la RP aumente.

Según la regresión lineal múltiple, en el Estadio Nacional, la resistencia a la penetración fue la variable más significativa al predecir θ_v . Por otro lado, en la UNALM, la resistencia a la penetración y el NDVI de césped fueron las variables más significativas al predecir θ_v .

VI. RECOMENDACIONES

1. Realizar las mediciones de las variables como humedad de suelo, resistencia a la penetración y NDVI en los meses de verano.
2. Durante este estudio no fue posible medir o controlar la dureza superficial del campo y desgaste deportivo, estos parámetros son importantes para el manejo de un campo de fútbol.
3. La evaluación de variables como NDVI y el contenido de agua en el suelo a través de cámaras multiespectrales y termales con drones.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Arrieta, C; Busey, P; Daroub, SH. 2009. Goosegrass and bermudagrass competition under compaction (en línea). *Agronomy Journal* 101(1):11–16. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0282>.

Association The European Irrigation. 2013. Certified Landscape Irrigation Auditor Training Manual. s.l., s.e. p. 107.

Barik, K; Lutfi, E; Rafiq, K; Sari, S; Angin, I. 2014. Spatial variability in soil compaction properties associated with field traffic operations (en línea). *Catena* 120:122–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.013>.

Baum, MC; Dukes, MD; Miller, GL. 2005. Analysis of Residential Irrigation Distribution Uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(4):336–341. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:4\(336\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:4(336)).

Beard, JB; Green, RL. 1994. The Role of Turfgrasses in Environmental Protection and Their Benefits to Humans. *460(30759):452–460*.

Bell, GE; Martin, DL; Wiese, SG; Dobson, DD; Smith, M. W; Stone, M. L; Solie, JB. 2002. Vehicle-Mounted Optical Sensing. *Crop Science* 42:197–201. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1970>.

Bremer, DJ; Lee, H; Su, K; Keeley, SJ. 2011. Relationships between normalized difference vegetation index and visual quality in cool-season turf grass: I. variation among species and cultivars (en línea). *Crop Science* 51(5):2212–2218. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.12.0728>.

Bremer, DJ; Lee, H; Su, K; Keeley, SJ. 2011. Relationships between normalized difference vegetation index and visual quality in cool-season turfgrass: II. factors affecting NDVI and

its component reflectances. *Crop Science* 51(5):2219–2227. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.12.0729>.

Burgess, TM; Webster, R. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. *Journal of Soil and Water Conservation* 31(2):315–331, 7 figs, 1 table, 27 refs. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1980.tb02084.x>.

Burt, CM; Clemmens, AJ; Strelkoff, TS; Solomon, KH; Bliesner, RD; Hardy, LA; Howell, TA; Eisenhauer, DE. 1997. Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123(6):423–442. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1997\)123:6\(423\)11](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:6(423)11).

Camdardella, C.; Moorman, T.; Novak, J.; Parkin, T.; Karlen, D.; Turco, R.; Konopka, A. 1994. Field - Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America* 58(5):1501–1511.

Caple, M. 2011. Mechanical behaviour of natural turf sports surfaces. Tesis de Doctorado de la escuela aplicada de ciencias, Cranfield University, UK. s.l., Tesis de Doctorado de School of Applied Sciences, Cranfield University, UK. .

Caple, M; James, I; Bartlett, M. 2012. Mechanical behaviour of natural turf sports pitches across a season. *Sports Engineering* 15(3):129–141.

Caple, M; James, I; Bartlett, M. 2012. Spatial analysis of the mechanical behaviour of natural turf sports pitches. *Sports Engineering* 15(3):143–157.

Carrow, RN; Cline, V. 2011. Precision turf management : A new water audit based on soil moisture. *Golf Course Management*, USA. USA, s.e.

Carrow, RN; Krum, JM; Flitcroft, I; Cline, V. 2010. Precision turfgrass management: Challenges and field applications for mapping turfgrass soil and stress (en línea). *Precision Agriculture* 11(2):115–134. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9136-y>.

Cassel, DK. 1983. Spatial and Temporal Variability of Soil Physical Properties Following

Tillage of Norfolk Loamy Sand (en línea). *Soil Science Society of America Journal* 49(3–4):196–201. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10858-011-9488-2>.

Chen, N; Zhang, X; Wang, C. 2015. Integrated open geospatial web service enabled cyber-physical information infrastructure for precision agriculture monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture* 111:78-91.

Christians, N. 2011. *Fundamentals of turfgrass management*. 4 ed. s.l., s.e. 398 p.

Christians, NE. 2011. *Fundamentals of Turfgrass Management* (en línea). 4, ilustra ed. John Wiley & Sons, 2011 (ed.). s.l., Wiley. Disponible en <https://books.google.com.pe/books?id=n8AaIDhznKYC>.

Clark, I. 1979. *Practical geostatistics*. London, Applied Science Publishers.

Coombes, J. (2002). Handy hints for variography (en línea). s.l., s.e. Disponible en <http://mmc2.igeofcu.unam.mx/cursos/geoest/Articulos/Geostatistics/Handy Hints For Variography.pdf>.

Cornell University. 2018. *Managing Thatch Sports Field Management* (en línea, sitio web). Consultado 14 dic. 2018. Disponible en <http://safesportsfields.cals.cornell.edu/managing-thatch>.

Corwin, DL; Lesch, SM. 2010. Delineating Site-Specific Management Units with Proximal Sensors (en línea). California, USA, Springer, Dordrecht. p. 139–165 DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8_6.

Demirel, K; Sener, S. 2009. Performance of Sprinkler Irrigation Systems at Different Pressures and Under Varying Wind Speed Conditions in Landscape Areas. *The Philippine Agricultural Scientist* 92(3):308–314.

Duffera, M; White, JG; Weisz, R. 2007. Spatial variability of Southeastern U.S. Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management. *Geoderma* 137(3–4):327–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.018>.

Dukes, MD; Haley, MB; Hanks, SA. 2006. Sprinkler Irrigation and Soil Moisture Uniformity. *In* 27th Annual International Irrigation Show San Antonio. 5 - 7 de Noviembre, Texas, USA, s.e.

Flitcroft, I; Krum, J; Carson, T; Cline, V; Carrow, R; Rice, K. 2010. Spatial Mapping Of Penetrometer Resistance On Turfgrass Soils For Site-specific Cultivation. *In* 10th International Conference on Precision Agriculture. Colorado, USA, s.e.

Freeland, RS; Sorochan, JC; Goddard, MJ; McElroy, JS. 2008. Using Ground-Penetrating Radar to Evaluate Soil Compaction of Athletic Turfgrass Fields. *Applied Engineering in Agriculture* 24(4):509–514.

Gibbs, RJ; Baker, SW (Sports TRIBB 1AU (United K. 1989. Soil physical properties of winter games pitches of different construction types: case studies at Nottingham and Warrington (en línea). *Journal of the Sports Turf Research Institute (United Kingdom)* . Consultado 17 nov. 2018. Disponible en <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=GB9012665>.

Giraldo, R. 2011. Introducción a la geoestadística (en línea). s.l., s.e. 94 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0627-7>.

Goap, A; Sharma, D; Shukla, AK; Rama Krishna, C. 2018. An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies (en línea). *Computers and Electronics in Agriculture* 155(May):41-49. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.040>.

González, J; Guerra, F; Gómez, H. 2007. Conceptos básicos de geoestadística en Geografía y Ciencias de la Tierra: Manejo y Aplicación. *Geoenseñanza* 12(1):81–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2009.03.016>.

González, P; Pérez, M; Gutiérrez, L. 2015. Effects of tillage intensities on spatial soil variability and site-specific management in early growth of *Eucalyptus grandis* (en línea). *Forest Ecology and Management* 346:41–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.031>.

Goovaerts, P; Goovaerts, DCEEP. 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation (en línea). s.l., Oxford University Press, (Applied geostatistics series). Disponible en <https://books.google.com.pe/books?id=CW-7tHAaVR0C>.

Guisasola, IN; Stiles, VH; James, IT; Dixon, SJ. 2009. Natural Turf Surfaces (en línea). *Sports Medicine* 39(1):65–84. DOI: <https://doi.org/10.2165/00007256-200939010-00005>.

Haggar, RJ; Stent, CJ; Isaac, S. 1983. A prototype hand-held patch sprayer for killing weeds, activated by spectral differences in crop/weed canopies (en línea). *Journal of Agricultural Engineering Research* 28(4):349–358. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(83\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0021-8634(83)90066-5).

Irrigation Association. 2011. *Irrigation*. 6 ed. USA, Irrigation Association. 1,114 p.

Irrigation Association USA. 2013. *Landscape Irrigation Auditor*. 3 ed. USA, Irrigation Association. 237 p.

Isaaks, EH; Srivastava, RM. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics* (en línea). s.l., Oxford University Press. Disponible en <https://books.google.com.pe/books?id=t62mtgAACAAJ>.

James, IT. 2011. Advancing natural turf to meet tomorrow's challenges. *Journal of Sports Engineering and Technology* 225(3):115–129. DOI: <https://doi.org/10.1177/1754337111400789>.

Johnston, K; Ver Hoef, JM; Krivoruchko, K; Lucas, N. 2001. Using ArcGIS geostatistical analyst. *Analysis* 300:300.

Júnior, VV; Carvalho, MP; Dafonte, J; Freddi, OS; Vidal Vázquez, E; Ingaramo, OE. 2006. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol. *Soil and Tillage Research* 85(1–2):166–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.01.018>.

Kieffer, DL; Connor, T. . 2007. Managing Soil Moisture on Golf Greens Using a Portable Wave Reflectometer. *In* 28th Annual Irrigation Show San Diego. 9-11 de Diciembre, California, USA, s.e.

Kieffer, DL; Huck, M. 2008. A comparison of fairway distribution uniformity computed with catch can data and with soil moisture data from three sampling depths. 29th Annual Irrigation Show :1–15.

Kieffer, DL; Huck, M. 2008. A comparison of fairway distribution uniformity computed with catch can data and with soil moisture data from three sampling depths. *In* 29th Annual Irrigation Show. 2-4 de Noviembre, California, USA, s.e.

Krum, JM; Carrow, RN.; Karnok, K. 2010. Spatial Mapping of Complex Turfgrass Sites: Site-Specific Management Units and Protocols (en línea). *Crop Science* 50:301–315. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.04.0173>.

Leib, BG; Jabro, JD; Matthews, GR. 2003. Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. *Soil Science* 168(6):396–408. DOI: <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000075285.87447.86>.

Leinauer, B; VanLeeuwen, DM; Serena, M; Schiavon, M; Sevostianova, E. 2014. Digital image analysis and spectral reflectance to determine turfgrass quality (en línea). *Agronomy Journal* 106(5):1787–1794. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj14.0088>.

Lulli, F; De Bertoldi, C. 2016. Precision Farming Practices in Sports Turf Management. *In* 5th European Turfgrass Society Conference, Turfgrass – Towards Sustainability and Perfection for Aesthetic, Recreational and Sports. s.l., s.e. p. 99–100 DOI: <https://doi.org/10.3727/036012918x15355691785681>.

Madison, J. H. 1971. Principles of turfgrass culture. New York, USA, Van Nostrand Reinhold Company. 420 p.

Marshall, TJ; Holmes, JW; Rose, CW. 1996. Soil Physics (en línea). s.l., Cambridge University Press. Disponible en <https://books.google.com.pe/books?id=pOPwygmWPEQC>.

McClements, I; Baker, SW. 1951. The journal of the Sports Turf Research Institute. (en línea). *Journal of the Sports Turf Research Institute* 70:29–43. Consultado 17 nov. 2018. Disponible en <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19950304134>.

McNitt, AS; Landschoot, PJ. 2003. Effects of soil reinforcing materials on the surface hardness, soil bulk density, and water content of a sand root zone. *Crop Science* 43(3):957–966. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.0957>.

Mecham, BQ. 2004. Using Distribution Uniformity to Evaluate the Quality of a Sprinkler System. *In Irrigation Association International Irrigation Show*. Tampa, Florida, USA, s.e.

Mecham, BQ; CID; CIC; CLIA. 2001. Comparison of Catch Can Distribution Uniformity to Soil Moisture Distribution Uniformity in Turfgrass and the Impacts on Irrigation Scheduling. *In Northern Colorado Water Conservancy District*. Colorado, USA, s.e.

Merriam, JL; Keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. Logan, Utah ,USA, Utah State Univ., Dept. of Agricultural and Irrigation Engineering.

Meyers, MC. 2010. Incidence, Mechanisms, and Severity of Game-Related College Football Injuries on FieldTurf Versus Natural Grass. *American Journal of Sports Medicine* 38(4):687–697. DOI: <https://doi.org/10.1177/0363546509352464>.

Miller, GL. 2004. Analisis of soccer field surface hardness. *In Acta Horticulturae*. s.l., International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. p. 287–294 DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.661.36>.

De Morales, M; Da Silva, V; Zwirtes, A; Carlesso, R. 2014. Use of penetrometers in agriculture : A review. *Engenharia Agrícola* 34:179–193. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000100019>.

Moreno Jiménez, A; Cañada Torrecilla, M. 2006. Sistemas y análisis de la información geográfica: manual de autoaprendizaje con ArcGis. s.l., s.e.

Morris, K; Shearman, R. 1998. NTEP turfgrass evaluation guidelines (en línea). 17:1–5. Disponible en <http://www.ntep.org/ntep/pdf/ratings.pdf>.

Oliver, M; Webster, R. 2015. Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging. s.l., SpringerBriefs in Agriculture.

Oliver, MA; Webster, R. 2014. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging (en línea). *Catena* 113:56–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>.

Orchard, J. 2001. The AFL penetrometer study: Work in progress. *Journal of Science and Medicine in Sport* 4(2):220–232. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1440-2440\(01\)80032-3](https://doi.org/10.1016/S1440-2440(01)80032-3).

Orchard, JW; Chivers, I; Aldous, D; Bennell, K; Seward, H. 2005. Rye grass is associated with fewer non-contact anterior cruciate ligament injuries than bermuda grass. *British Journal of Sports Medicine* 39(10):704–709. DOI: <https://doi.org/10.1136/bjism.2004.017756>.

Petrass, LA; Twomey, DM. 2013. The relationship between ground conditions and injury: What level of evidence do we have? (en línea). *Journal of Science and Medicine in Sport* 16(2):105–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2012.07.005>.

Piedrahita, AL. 2015. Uso de la geoestadística como herramienta de análisis para formalizar resultados en el campo de la contaminación electromagnética Use of geostatistical as analysis tool to formalize results in the field of electrosmog. 5(10):55–66.

Pinzón, LP; Alvarez, JG; Mesa, A. 2016. Study of the spatial variability of moisture and compaction in soils with different plant covers (en línea). *Agronomía Colombiana* 34(3):355. DOI: <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n3.59984>.

Plauborg, F; Iversen, B; Lærke, P. 2005. In Situ Comparison of Three Dielectric Soil Moisture Sensors in Drip Irrigated Sandy Soils. s.l., s.e., vol.4. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0138>.

Puhalla, J; Krans, J; Goatley, M. 1999. *Sports Fields: A Manual for Design, Construction and Maintenance*. s.l., Wiley.

Robert, P.; Rust, R.; Larson, W. 1996. Precision agriculture. *Wisconsin*, s.e. 285–297 p. DOI: <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-778-3>.

Romero, R; Muriel, JL; García, I; Muñoz de la Peña, D. 2012. Research on automatic

irrigation control: State of the art and recent results. *Agricultural Water Management* 114:59-66.

Rossi, RE; Mulla, DJ; Journel, AG; Franz, EH. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs* 62(2):277–314. DOI: <https://doi.org/10.2307/2937096>.

Schabenberger, O; Gotway, C. A. 2004. *Statistical Methods for Spatial Data Analysis*. s.l., Taylor & Francis, (Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science).

Sherratt, P. (2011). *The benefits of Turf*. Ohio, s.e.

Simons, K. 2019. *Useful Stata Commands*. s.l., s.e.

Spectrum Technologies, I. (s. f.). *Instrucciones para el servicio y la utilización del medidor de compactación del suelo Field Scout SC-900*. s.l., s.e.

SportsTurf. 2012. *Guía de la STMA para la mantención de campos de futbol internacional*. s.l., s.e. p. 1–19.

Straw, CM. 2017. *Spatiotemporal variation of turfgrass sports fields and its influence on athletes` perceptions and injury occurrence*. s.l., Tesis de Doctorado, The University of Georgia, Georgia, USA. 176 p.

Straw, CM; Bowling, WJ; Henry, GM. 2017. Rainfall versus Irrigation Influences Penetration Resistance and Surface Hardness on a Recreational Sports Field (en línea). *International Turfgrass Society and ACSESS* 13:1–5. DOI: <https://doi.org/10.2134/itsrj2016.10.0842>.

Straw, CM; Carrow, RN; Bowling, WJ; Tucker, KA; Henry, GM. 2018. Uniformity and spatial variability of soil moisture and irrigation distribution on natural turfgrass sports fields. *Soil and Water Conservation* 73(5):1–28.

Straw, CM; Grubbs, RA; Tucker, KA; Henry, GM. 2016. *Handheld versus Mobile Data Acquisitions for Spatial Analysis of Natural Turfgrass Sports Fields* (en línea). *HortScience*

51(9):1176–1183. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11019-16>.

Straw, CM; Henry, G. M; Love, K; Carrow, RN; Cline, V. 2018. Evaluation of Several Sampling Procedures for Spatial Analysis of Natural Turfgrass Sports Field Properties (en línea). *Journal of Testing and Evaluation* 46(2):714–729. DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE20160467>.

Straw, CM; Henry, GM. 2018. Spatiotemporal variation of site-specific management units on natural turfgrass sports fields during dry down (en línea). *Precision Agriculture* 19(3):395–420. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9526-5>.

Takemura, M; Schneiders, AG; Bell, ML; Milburn, PD. 2007. Association of ground hardness with injuries in rugby union. *British Journal of Sports Medicine* 41(9):582–587. DOI: <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.035568>.

Tamagi, JT; Uribe-opazo, MA; Boas, MAV; Johann, JA; Guedes, LPC. 2018. Spatial variability of the water depth applied by fixed sprinkler irrigation systems (en línea). *Engenharia Agrícola* 38(2):188–196. DOI: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n2p188-196/2018>.

Taylor, JC; Wood, GA; Earl, R; Godwin, RJ. 2003. Soil factors and their influence on within-field crop variability, Part II: Spatial analysis and determination of management zones. *Biosystems Engineering* 84(4):441–453. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00005-9).

The New Jersey Turfgrass Association. 2014. 2006 Turfgrass Proceedings. s.l., s.e.

The Pennsylvania State University. 2018. Managing Thatch in Lawns — Center for Turfgrass Science — Penn State University (en línea, sitio web). Consultado 14 dic. 2018. Disponible en <https://plantscience.psu.edu/research/centers/turf/extension/factsheets/thatch>.

Trenholm, L. E; Carrow, RN; Duncan, R. R. 1999. Relationship of Multispectral Radiometry Data to Qualitative Data in Turfgrass Research. *Crop Science* 39:763–769. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X003900030025x>.

Turgeon, AJ. 2011. Turfgrass Management (en línea). 9 ed. Pearson Education, 2011 (ed.). s.l., Pearson Education. Disponible en <https://books.google.com.pe/books?id=AUMrAAAAQBAJ>.

Vis, E; Kumar, R; Mitra, S. 2007. Comparison of Distribution Uniformities of Soil Moisture and Sprinkler Irrigation in Turfgrass. *In* CLCA Environmental Research Funding Program. California, USA, s.e.

Wherley, BG; Sinclair, TR. 2009. Differential sensitivity of C3 and C4 turfgrass species to increasing atmospheric vapor pressure deficit. (En author affiliation: agronomy physiology laboratory, university of florida, p.o. box 110965, gainesville, fl 32611-0965, usa.author email: trsinc@ufl.edu). *Environmental and Experimental Botany* 67(2):372–376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.07.003>.

Xiong, X. 2001. The relationship among ndvi, nitrogen and irrigation on bermudagrass. s.l., Tesis de Doctorado, Oklahoma State University, Oklahoma, USA. 130 p.

Xiong, X; Bell, GE; Solie, JB; Smith, MW; Martin, B. 2007. Bermudagrass seasonal responses to nitrogen fertilization and irrigation detected using optical sensing (en línea). *Crop Science* 47(4):1603–1610. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0400>.

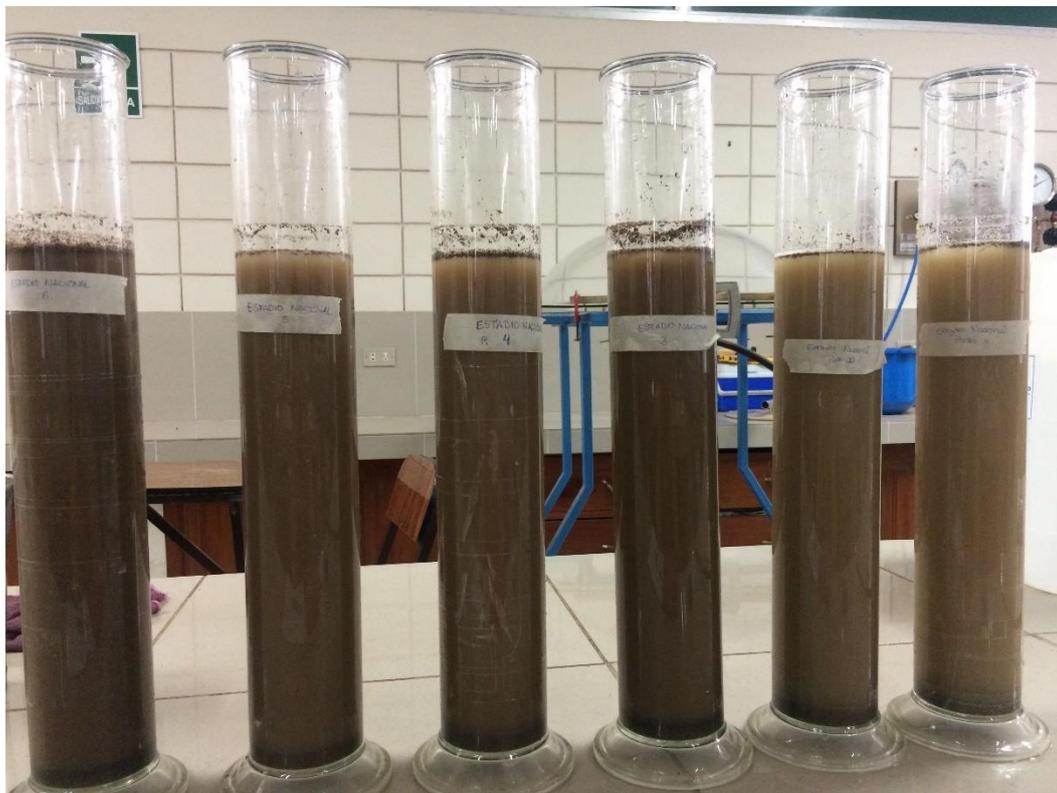
Zhu, X; Chikangaise, P; Shi, W; Chen, WH; Yuan, S. 2018. Review of intelligent sprinkler irrigation technologies for remote autonomous system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 11(1):23-30.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: UNALM y Estadio Nacional



Anexo 2: Suelo Probetas con 6 muestras de suelo del estadio nacional para la prueba de Bouyoucos.



Anexo 3: Muestras de suelo y césped realizadas en el estadio nacional



Anexo 4: Sistema de riego por aspersión del estadio nacional, (a) cabezal de riego, (b) cañón de riego encendido.



Anexo 5: Componentes del sistema de riego por aspersión de la UNALM, (a) filtro de malla, (b) controladores de riego.



Anexo 6: Hojas técnica del cañón del sistema de riego del Estadio Nacional

VYR-977 "OLIMPIA"

Exploded view and tables

• Piston-driven sprinkler for sport areas, parks, and recreational areas, made with protective plastic and the option of a cap covered with rubber or artificial turf. The significant turning radius makes this sprinkler suitable for football fields (they can be watered from the outside) and for golf courses (a single sprinkler per green may be enough).

The internal piston drive and the jet breaker provide the best distribution of water, even in the immediate surrounding area. This sprinkler saves a surprising amount of energy compared with similar products on the market.

This high flow "pop-up gun" sprinkler is suitable for irrigation of large recreational areas. Its long range design means that the spacing between sprinklers is the largest on the pop-up sprinkler in the market and it also has a very high distribution coefficient.

The most common applications are: football fields, polo fields, olympic stadiums, equestrian centres, golf courses, rugby fields, baseball fields, etc.

Boquilla/Nozzle	4 bar		5 bar		6 bar		7 bar		8 bar	
	m ³ /h	m								
16 x 7,0	21,70	31,0	24,26	33,3	26,58	35,5	28,71	37,8	32,20	40,0
18 x 7,0	26,54	32,0	29,67	34,5	32,50	37,0	35,11	39,5	39,04	42,0
20 x 7,0	31,95	33,0	35,72	35,8	39,13	38,5	42,26	41,3	46,69	44,0
22 x 7,0	37,92	34,0	42,40	37,0	46,45	40,0	50,17	43,0	55,14	46,0
24 x 7,0	44,47	35,0	49,72	38,3	54,46	41,5	58,83	44,8	64,40	48,0
26 x 7,0	51,58	36,0	57,67	39,5	63,18	43,0	68,40	46,5	74,46	50,0



ref. 097700



VYR-977 "OLIMPIA"

Pop-up impact gun sprinklers

General properties:

- Part circle pop-up gun sprinkler with piston-controlled rotation system lubricated with water.
- 2 1/2" side female connection.
- Made of brass, stainless steel and Delrin plastic.
- Teflon and rubber rotation joints.
- Built-in check valve (8.8 m water column).
- Removable grit filter for maintenance cleaning.

Technical specifications:

- Reach: 30 - 50 m.
- Flow: 21,000 - 75,000 l/h.
- Working pressure: 3 - 8 bar.
- Area: Full or part circle.
- Nozzles: A multi-jet nozzle made up of short, medium and long reach jets, with 6 models of 16, 18, 20, 22, 24 and 26 mm.
- Trajectory angles: 23°.
- Maximum stream height: 5 m.
- Rotation time: 360° between 100 and 240 seconds (adjustable)
- Uniformity coefficient higher than 90% in areas of 50x50R, 55x55T, 50x65T.

Applications:

- Sports fields of natural or artificial turf or sand: football, rugby, baseball, horse riding, golf, etc.
- Large commercial areas and urban parks.

Measurements:

- Visible cover width: 39 cm
- Sprinkler height: 62 cm.
- Pop-up: 15 cm.
- Weight: 19.4 kg.
- Units per box: 1.

Options:

- Manual driving kit
- 3" 24 VAC solenoid hydraulic valve
- 3" 12 VDC solenoid hydraulic valve
- 3" 9 - 12 VDC solenoid hydraulic valve LATCH
- Maintenance tools.

Models:

- Ref. 097700:** Part circle single sprinkler
- Ref. 097705:** Part circle sprinkler with 24 VAC electrically operated hydraulic valve
- Ref. 097710:** Part circle sprinkler with 12 VDC electrically operated hydraulic valve
- Ref. 097715:** Part circle sprinkler with 9 - 12 VDC hydraulic valve LATCH

Anexo 7: Informe técnico del (a) análisis físico y (b) microbiológico del agua de riego de la UNALM.

(a)



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 Av. La Molina s/n La Molina - Lima - Perú
 Teléfono: 6147800 anexo 274



INFORME DE ENSAYO N° 1804116 - LMT

SOLICITANTE : UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO

MUESTRA : AGUA DE RÍO
 1804116) RESERVOIRIO R1 – A – EN REPOSO

PROCEDENCIA : UNALM
TIPO DE ENVASE : Botella de plástico
CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 3 000 ml aprox.
ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado
FECHA DE MUESTREO : 2018 - 04 - 11
FECHA DE RECEPCIÓN : 2018 - 04 - 11
FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2018 - 04 - 11
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2018 - 04 - 16

RESULTADOS DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Análisis Microbiológico	Muestra 1804116	Estándares Nacionales De Calidad Ambiental Para Agua (*)
¹ Enumeración de coliformes fecales (NMP/100mL)	92 x 10	10 x 10 ²
¹ Enumeración de <i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	92 x 10	10 x 10 ²
² Conteo de larvas y huevos de Helmintos (N°/L)	< 1	1

(*) Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales. Subcategoría D1: Riego de vegetales. B) Agua para riego no restringido

Nota: Los valores <1.8 y < 1 indican ausencia de microorganismos en ensayo.

Método:
¹SMEWW 21st Ed. 2005, Part 9221. APHA-AWWA-WEF.
²SMEWW 21st Ed. 2005, Part 10750. APHA-AWWA-WEF.

Observaciones:
 Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio, en muestra proporcionada por el solicitante.
 Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.
 Validez del documento: Este documento es válido solo para la muestra descrita.

La Molina, 16 de Marzo de 2018



p. D. Zúñiga Dávila
 DRA. DORIS ZÚÑIGA DÁVILA
 Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología "Marino Tabusso"
 Universidad Nacional Agraria La Molina
 Teléfono: 614 7800 anexo 274
 E-mail: lmt@lamolina.edu.pe

LABORATORIO DE ECOLOGIA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGIA "MARINO TABUSSO"
 + (511) 6147800 anexo 274 - E-mail: lmt@lamolina.edu.pe

(b)



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH
LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO

Av. La Molina s/n. Telefax: 6147800 Anexo 226 Lima. E-mail: las-fla@lamolina.edu.pe



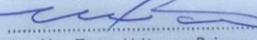
Nº 008689

ANALISIS DE AGUA - RUTINA

SOLICITANTE : ING. DAVID ASCENCIOS TEMPLO
PROYECTO : FINES ACADEMICOS UNIDAD DE RIEGO TECNIFICADO (URT)
PROCEDENCIA : Unidad de Riego Tecnificado - Reservorio RI-A
RESPONSABLE ANALISIS : Ing. Nore Arévalo Flores
FECHA DE ANALISIS : La Molina, 12 de abril de 2018

Nº LABORATORIO	8689
Nº DE CAMPO	5010
CE dS/m	0.46
pH	9.90
Calcio meq/l	2.83
Magnesio meq/l	0.64
Sodio meq/l	0.93
Potasio meq/l	0.01
SUMA DE CATIONES	4.41
Cloruro meq/l	0.88
Sulfato meq/l	1.94
Bicarbonato meq/l	0.00
Nitratos meq/l	0.00
Carbonatos meq/l	1.50
SUMA DE ANIONES	4.32
SAR	0.71
CLASIFICACION	C2-S1
Boro ppm	0.09
Fosforo mgP-total/L	2.03
Nitrogeno mgN-total/L	5.17

LABORATORIO DE ANALISIS DE AGUA Y SUELO


Ing. Msc. Teresa Velásquez Bejarano
JEFE DE LABORATORIO

