

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
VALPARAÍSO - CHILE



“ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN DE RIEGO DE ÁREAS VERDES”

ROBERTO FELIPE FUENTES ZENTENO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN INFORMÁTICA

Profesor Guía: Dra. María Cristina Riff Rojas
Profesor Correferente: Dra. Elizabeth Montero Ureta

Noviembre - 2019

DEDICATORIA

Considerando lo importancia de este trabajo para los alumnos, este apartado es para que el autor entregue palabras personales para dedicar este documento. La extensión puede ser de máximo una hoja y se deben mantener este formato, tipo y tamaño de letra.

AGRADECIMIENTOS

Considerando la importancia de este trabajo para los alumnos, este apartado se podrá incluir en el caso de que el autor desee agradecer a las personas que facilitaron alguna ayuda relevante en su trabajo para la realización de este documento. La extensión puede ser de máximo una hoja y se deben mantener este formato, tipo y tamaño de letra.

RESUMEN

Resumen— El consumo de agua para el riego de áreas verdes es una actividad importante a considerar en la actualidad. Muchas instituciones no saben con certeza cuanta agua se debe suministrar a un área verde para que esta pueda mantenerse bien cuidada, regando de forma desorganizada y desperdiciando varios litros de agua al día. El objetivo de esta memoria es crear un algoritmo que permita generar una planificación de riego eficiente mediante el uso de datos del terreno e información climática, para poder así optimizar la cantidad de agua usada para regar un terreno mediante rangos de hora establecidos donde los aspersores deben funcionar. Esta planificación se envía a las válvulas respectivas, las cuales irrigarán los sectores correspondientes a la hora designada, automatizando el proceso de riego. El algoritmo propuesto fue ejecutado en la plaza Arturo Prat de la comuna de Puente Alto en la región metropolitana de Chile, teniendo buenos resultados respecto al control de la cantidad de agua a regar, reduciendo además el total de irrigación de las áreas verdes con respecto a los años 2017 y 2018.

Palabras Clave— Planificación de riego, irrigación de áreas verdes, optimización de agua.

ABSTRACT

Abstract— The use of water to irrigate green areas is an important activity to consider today. Many institutions do not know with assurance how much water must be supplied to a green area so that it can be maintained well cared for, irrigating in a disorganized way and wasting several liters of water a day. The objective of this memory is to create an algorithm to generate efficient irrigation scheduling through the use of soil data and climate information, in order to optimize the amount of water used to irrigate a field through established time ranges where the sprinklers must operate. This schedule is sent to the respective valves, which will irrigate the corresponding sectors at the designated time, automating the irrigation process. The proposed algorithm was executed in the Arturo Prat plaza of the Puente Alto commune in the metropolitan region of Chile, with good results in controlling the amount of water to irrigate, also reducing the total irrigation of green areas compared to 2017 and 2018.

Keywords— Irrigation scheduling, green areas irrigation, water optimization.

GLOSARIO

Se presentan algunas siglas ocupadas para el presente trabajo:

- ET_o : Evapotranspiración del cultivo de referencia.
- ET_c : Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar.
- K_c : Factor de cultivo.
- Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor.
- T_{mean} : Temperatura media del aire.
- u_2 : Velocidad del viento promedio.
- z : Elevación sobre el nivel del mar de una estación.
- e_s : Presión media de vapor de saturación.
- e_a : Presión real de vapor de saturación.
- R_n : Radiación neta del terreno.
- G : Flujo de calor del suelo.
- γ : Constante psicrométrica.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	IV
ABSTRACT	IV
GLOSARIO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.1 Datos globales	3
1.1.1 Evapotranspiración	3
1.1.2 Pronóstico de la lluvia	5
1.2 Datos locales	6
1.2.1 Área de un sector	6
1.2.2 Factor de cultivo	6
1.2.3 Flujo de las válvulas	6
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	8
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE SOLUCIÓN	12
3.1 Algoritmo de evapotranspiración	12
3.2 Primera parte del algoritmo de planificación	18
3.3 Segunda parte del algoritmo de planificación	20
CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN	22
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	31
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Estructura de un parque perteneciente a una institución.	3
2	Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y bajo condiciones estándar (ET_c) explicada por R.G. Allen [3].	5
3	Gráfica de flujo de un sector por tiempo (horas)	7
4	Comparación entre evapotranspiración usando los 24 datos (ET_o teórico) y usando los 21 datos disponibles hasta las 21:00 (ET_o algoritmo)	17
5	Histograma del error absoluto entre evapotranspiración usando los 24 datos (ET_o teórico) y usando los 21 datos disponibles hasta las 21:00 (ET_o algoritmo)	18
6	Distancia de vincenty entre Londres y Beijing	19
7	Distancias vincenty de distintas estaciones a plaza Santa Teresa en Colina	20
8	Logo de API's de datos globales	22
9	Imagen principal de la página	23
10	Listado de áreas verdes	24
11	Información principal de un área verde	24
12	Listado de sectores de un área verde	25
13	Detalle de un nodo en particular	25
14	Resumen de riego por sectores	26
15	Reporte por mes de área verde	27
16	Gráficas de consumo de agua, tiempo de riego y evapotranspiración . . .	28
17	Gráficas de temperatura y pronóstico de lluvia	28
18	<i>Boxplots</i> del consumo de riego de los meses donde fue ejecutado el algoritmo.	30

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los tantos elementos que varios países están empeñados en cuidar, por lo que controlar y optimizar su uso en cualquier actividad puede ayudar en gran medida tanto a reducir los costos de una empresa o institución como contribuir al planeta en su totalidad.

Dentro de la vasta gama de actividades donde este recurso es usado, una de ellos es el riego de parques. Este proceso demanda varios litros de agua diariamente con el fin de mantener bien cuidados los sectores que conforman un terreno público, por lo que controlar el proceso de irrigación de áreas verdes es una tarea importante que ayudará a optimizar los factores anteriormente mencionados.

En esta memoria se explicará y construirá en base a estudios previos, un algoritmo basado en recopilar datos climáticos (tales como pronósticos de lluvia, temperaturas máximas y mínimas, velocidad del viento, entre otros) en conjunto con datos locales de un parque en particular (metros cuadrados de un sector, factores de cultivo, etc), para determinar cuanta agua se necesita para mantener bien preservado dicho parque. Es necesario tomar en cuenta que el usuario debe ingresar la menor cantidad de datos posibles, contribuyendo así a la automatización de este proceso.

El objetivo que busca este trabajo es analizar diversos algoritmos de planificación de riego y usarlos como base para poder crear un algoritmo de irrigación que se usará para mantener bien cuidado diversos parques o áreas verdes. La finalidad de lo previamente mencionado es conocer las horas en las que los aspersores empezarán a regar y la cantidad de agua que cada aspersor debe lanzar en base a un previo análisis climático. Esta irrigación se dividirá en cantidades iguales de agua, las cuales empezarán a ser distribuidas por los aspersores en ciertos instantes de tiempos que serán determinados por el algoritmo.

En este documento se presenta una introducción al problema, seguido de la definición del mismo para continuar con un breve estado del arte. Luego, se prosigue con la propuesta de solución a la problemática presentada, la validación de dicha solución y finalmente concluir con las conclusiones del trabajo, junto a los anexos y referencias bibliográficas.

CAPÍTULO 1

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema de la planificación de riego (*Irrigation scheduling* [8]) tiene como objetivo entregar rangos de hora donde se empezará y terminará de regar, con el fin de suministrar diariamente la cantidad suficiente de agua a un parque.

Actualmente varias organizaciones de Chile no cuentan con un sistema de planificación de riego automático, siendo este un proceso manual. A modo de ejemplo se puede mencionar a la Municipalidad de Colina y la de Puente Alto que se ubican en la región metropolitana, donde las plazas que administran eran irrigadas en rangos aleatorios de tiempo, sin tener una noción de cuanta agua gastaban diariamente en esta actividad. Este proceso sin supervisión a largo plazo produce un gran gasto de recursos que puede afectar las finanzas de instituciones como las previamente mencionada, por lo que poder encontrar un rango de horas definido para regar y saber la cantidad de agua usada diariamente es una decisión crítica sobretodo en tiempos de sequía. El trabajo de esta memoria se realiza en la empresa SmartCity SpA (ubicada en Santiago de Chile), y el nombre del proyecto es smartDrop.

Antes de definir la planificación se necesita conocer algunos detalles del terreno en general. Las áreas verdes cuentan con bastante césped y plantas, y presentan una importante pérdida de humedad durante el día debido a los ciclos de **transpiración** y **evaporación**. La cantidad de agua requerida debe ser suministrada nuevamente a dicha superficie para mantenerla bien cuidada para permitir el desarrollo normal de los ciclos previamente mencionados (transpiración y evaporación), de lo contrario la hierba del sector empezará a secarse lentamente, transformándose así en un terreno seco y sin vida.

Por otra parte, una institución puede tener varios parques. Cada parque a su vez tiene diferentes sectores de riego que están definidos por las posiciones de diversas válvulas. En la figura 1 se muestra la estructura de un parque perteneciente a una institución cualquiera, donde cada sector posee un aspersor (puntos de color verde) que puede cubrir con agua una cierta cantidad de terreno.

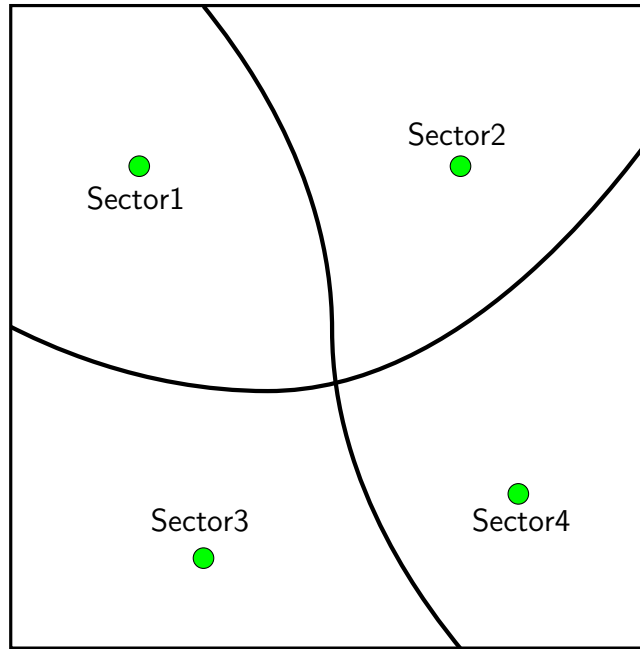


Figura 1: Estructura de un parque perteneciente a una institución.

La idea principal es suministrar toda el agua en un horario donde no transite gente, ya que al ser un espacio público se busca no molestar a los transeúntes con el riego. Un buen momento para esto es realizar esta actividad en la noche o madrugada, lo que nos entrega una cota inferior y superior de horas para poder trabajar. Este rango de horas será ingresado por el usuario.

El proceso anterior se logra mediante el uso de factores climáticos históricos globales del terreno, en conjunto con datos locales propios del mismo parque. Se debe entonces presentar ambos puntos mencionados anteriormente en detalle, ya que éstos en la literatura son la base de varios algoritmos, y en particular de la propuesta de solución de esta memoria.

1.1. Datos globales

En esta sección se revisarán en detalle los factores que afectan a todos los parques por igual y que se circunscriben a los conocidos como la **evapotranspiración** [7] y el **pronóstico de la lluvia** [16].

1.1.1. Evapotranspiración

El dato global más importante que se requiere para el riego de áreas verdes es la **evapotranspiración** (ET) la que corresponde a la combinación de dos procesos: el agua que se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y mediante transpiración del cultivo. Estos procesos ocurren simultáneamente y no existe una manera sencilla de distinguir entre ellos. La evaporación de un suelo es determinada principalmente por

la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo, la cual disminuye a medida que empieza a oscurecer. En primera instancia, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del día, la transpiración se convierte en el proceso principal de pérdida de agua. La ET busca entonces relacionar la pérdida de agua de estos dos procesos en una determinada unidad de tiempo. La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros por unidad de tiempo ($\frac{mm}{t}$), y para efectos de esta memoria se trabajará en ($[\frac{mm}{dia}]$), ya que el conjunto de datos recolectado para construir el modelo posterior es captado diariamente.

El clima y las características del cultivo son factores que afectan la evaporación y la transpiración, y consecuentemente a la evapotranspiración.

Existe un tercer factor que depende de condiciones ambientales, sin embargo este factor no será analizado debido a que normalmente es ocupado para condiciones no óptimas como son la presencia de plagas, salinidad del suelo, baja fertilidad y limitación o exceso de agua. Para esta memoria se asumirá que el algoritmo será ejecutado bajo condiciones estándar (buena fertilidad de suelo, terreno controlado y sin plagas, entre otros). A continuación se presenta en detalle los factores previamente mencionados:

1. **Variables climáticas:** Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar este término a partir de estos parámetros, y este factor se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), el cual representa la pérdida de agua de una superficie estándar. En la figura 2 se observa un ejemplo de cómo obtener la ET_o de un cierto sector en base a los datos climáticos previamente mencionados. Es importante destacar que este cálculo se hace en base a un cultivo de referencia base, es decir que se asumirá que todo el terreno está cubierto con pasto.
2. **Factores de cultivo:** El tipo de cultivo debe ser considerado cuando se evalúa la evapotranspiración que se desarrolla en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en transpiración, altura del cultivo, rugosidad, entre otros, dan lugar a diferentes niveles de la ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) se refiere a la evapotranspiración sobre cultivos que crecen en áreas grandes, con características ambientales adecuadas y que se alcanzan bajo las condiciones climáticas dadas. En la figura 2 se observa como calcular este valor en base al ET_o en conjunto con el factor de cultivo K_c , el cual es un factor propio y que dependerá del sector que se esté analizando. Este será el término que se usará en la presente memoria para determinar la cantidad de agua que se debe usar para reponer el líquido perdido por cada sector.

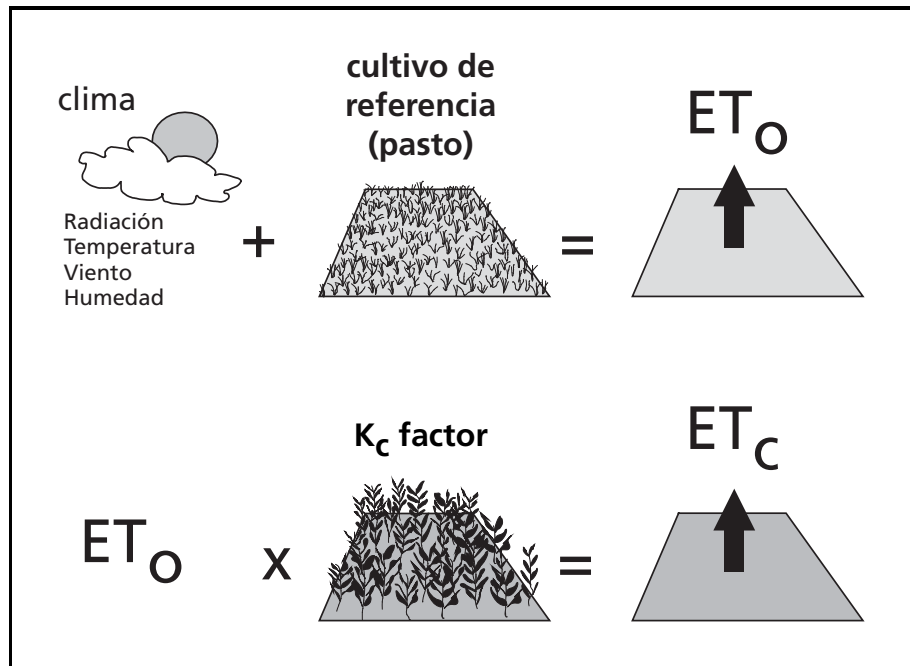


Figura 2: Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y bajo condiciones estándar (ET_c) explicada por R.G. Allen [3].

Para el cálculo de la ET_o los únicos componentes necesarios son parámetros climáticos, por lo que este número puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. En la literatura se recomienda el método FAO Penman-Monteith [3] como el mejor método de determinación de la ET_o con parámetros climáticos, debido a que aproxima de una manera cercana la evapotranspiración de cultivo de referencia de cualquier localidad evaluada, ya que posee bases físicas sólidas y se han desarrollado procedimientos para la estimación de los parámetros climáticos faltantes.

Sin embargo, muchos sitios web que entregan este factor lo hacen al día siguiente del cual se solicitó, siendo un dato no acorde al requerimiento ya que se necesita este dato en la noche del día actual o madrugada del día siguiente, por lo que uno de los desafíos de esta memoria es obtener este dato en base a factores climáticos recopilados por hora para todos los días, teniendo así disponibilidad de este termino en la horas deseadas.

Una vez obtenida la ET_o del terreno, se debe obtener la ET_c de los distintos factores, multiplicando este término por el factor de cultivo K_c de cada sector para obtener la cantidad de agua necesaria para recuperar el agua perdida por el parque.

1.1.2. Pronóstico de la lluvia

Si bien la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar es un excelente dato para saber la cantidad de agua que se debe suministrar a los distintos sectores del terreno, este factor no considera la lluvia que pudo haber caído sobre el terreno durante el día. Este es un parámetro importante a considerar en el parque, puesto que entre más llueva menos será el agua necesaria para regar cada sector, por lo que pronosticar

cuantos milímetros de agua caerán en un parque por metro cuadrado será otra tarea a considerar dentro del algoritmo.

Estos dos factores entregan como resultado la cantidad de agua por metro cuadrado que se necesita suministrar al parque para mantenerlo bien cuidado. Sin embargo, aún se requiere información sobre cada sector para determinar la cantidad de agua total a utilizar.

1.2. Datos locales

En esta sección se verán en detalle los factores propios de cada sector de un parque en particular. Dentro de los datos locales mas importantes a considerar se tiene el **área de un sector**, el **factor de cultivo** y el **flujo de las válvulas**. Cabe destacar que todos los datos explicados a continuación es información de entrada para el algoritmo de planificación de riego.

1.2.1. Área de un sector

Uno de los componentes a considerar dentro del algoritmo es el área en metros cuadrados de cada sector y por cada parque perteneciente a una institución. Este elemento se considera invariante en el tiempo por lo que puede ser calculado previamente y solo una vez.

1.2.2. Factor de cultivo

Un elemento indispensable para obtener la ET_c de cada sector es el factor de cultivo K_c , el cual es una constante adimensional.

K_c integra las características que distinguen a un cultivo típico de campo de otro con apariencia uniforme y que cubre completamente la superficie del suelo (como los estadios de fútbol, por ejemplo). En consecuencia, distintos sectores poseerán distintos valores de coeficiente de cultivo, puesto que los parques no solo poseen pasto uniforme, teniendo otros tipos de plantas o arbustos que hacen que el cálculo de la ET_o no sea suficiente para conocer la cantidad de agua evaporada por el suelo. Este factor depende del tipo de cultivo, el clima, la evaporación del suelo, entre otros elementos.

Es importante mencionar que este factor es muy poco variante en el tiempo para los parques en general ($0,9 \leq K_c \leq 1,1$), puesto que no se realizan cultivos mas complejos (caña de azúcar, algodón, maíz, entre otros cultivos).

1.2.3. Flujo de las válvulas

Como se mencionó anteriormente, cada sector se caracteriza por poseer un aspersor que cubre con agua dicho terreno día a día. Cada válvula posee un flujo distinto para irrigar el terreno que varía con el paso del tiempo, teniendo un tope de flujo máximo que depende de la máquina. Para efectos de esta memoria los flujos de los diversos aspersores

serán calculados y guardados en una base de datos adicional, siendo entregados al algoritmo como un flujo promedio, puesto que el flujo también es un dato que varía muy poco en el tiempo.

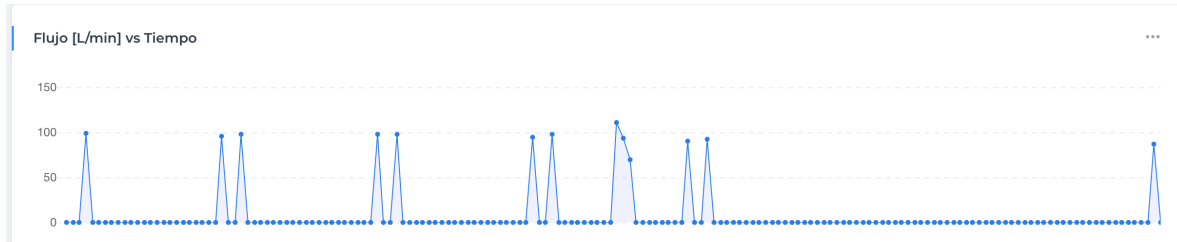


Figura 3: Gráfica de flujo de un sector por tiempo (horas)

Una vez estudiados los datos locales y globales de un parque, el algoritmo debe ser capaz de:

1. Calcular, por sector, la cantidad de agua que se debe utilizar para reponer aquella perdida el día anterior por dicho terreno, y poder suministrar esta cantidad en los horarios establecidos.
2. Entregar rangos de hora donde se irrigará el pasto a un flujo promedio en base al rango de hora total entregado por el usuario.

El algoritmo se describirá en detalle en el capítulo 3 del presente trabajo. A continuación, se presenta una breve revisión del estado del arte de técnicas utilizadas para resolver el problema de riego de areas verdes.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

En el paper *Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change* [1] ya se discutía sobre la forma más óptima de poder regar áreas verdes, analizando muchos modelos de evapotranspiración. El artículo evalúa los modelos e identifica aquel que mejor representa de manera global el riego a un terreno, concluyendo que el modelo de FAO Penman-Monteith es el mejor modelo global y que considera factores físicos y climáticos directamente relacionados con el ET_o , tales como la temperatura, la radiación solar, la humedad relativa, la velocidad de viento, entre otros, además de ser un valor calculable con datos relativamente fáciles de obtener. Además, analizan como el cambio climático (aumento de CO_2 , aumento de lluvias en ese tiempo, etc) afecta tanto a este factor como al terreno en general, concluyendo que en promedio la evapotranspiración puede adaptarse a estos cambios climáticos y proporcionar un buen plan de irrigación.

Sabiendo esto, en el libro “Evapotranspiración del cultivo” [3] se presenta una definición formal del concepto de evapotranspiración, además de los distintos usos, fórmulas y cálculos que tienen los distintos tipos de evapotranspiración. El artículo ilustra el uso del método FAO Penman-Monteith, el cual utiliza datos climáticos estándar o derivados de datos comúnmente medidos. Todos los procedimientos de cálculo han sido estandarizados en función de los datos meteorológicos disponibles y la escala de tiempo de los cálculos. Este método, así como los procedimientos para la estimación de datos climáticos faltantes se discuten con más detalle dentro del libro. La ecuación de FAO Penman-Monteith que será usada en esta memoria se presenta a continuación:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Donde:

- ET_o : Evapotranspiración de referencia [$\frac{mm}{dia}$]
- R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo [$\frac{Mj}{m^2 dia}$]
- G : Flujo del calor de suelo [$\frac{Mj}{m^2 dia}$]
- T_{mean} : Temperatura media del aire a 2 m de altura [C]
- u_2 : Velocidad del viento a 2 m de altura [$\frac{m}{s}$]
- e_s : Presión media de vapor de saturación [kPa]
- e_a : Presión real de vapor [kPa]

- $e_s - e_a$: Déficit de presión de vapor [kPa]
- Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor [$\frac{kPa}{C}$]
- γ : Constante psicrométrica [$\frac{kPa}{C}$]

La irrigación de los parques puede optimizarse en gran manera a través de tecnologías que apliquen la cantidad precisa de agua demandada por las áreas verdes. El objetivo entonces que plantea el paper “*A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops*” [5] es programar el riego mediante los requisitos particulares de cada sector y la variabilidad (encontrada durante la temporada) de las condiciones climáticas, entre otros factores. El artículo propone un algoritmo que coordina siete tareas automatizables:

1. Estimación de las necesidades de riego.
2. Adaptación a una configuración de riego particular.
3. Ejecución del programa.
4. Monitoreo de suelo y/o planta.
5. Interpretación de datos de sensores.
6. Reacción a eventos ocasionales.
7. Ajuste del modelo de necesidades de riego

Además se prueba el algoritmo con un huerto de duraznos donde se configuró una herramienta de software que implementa el algoritmo para administrar el riego bajo diferentes estrategias. Dentro de estas pruebas se incluían dos métodos alternativos para estimar las necesidades de agua del parque: un balance de agua típico basado en la evapotranspiración de referencia (ET_o) y una variación basada en la medición de la radiación solar. También se incluye dos tipos de sensores para la retroalimentación del algoritmo: sensores de agua del suelo y dendrómetros (usados para aplicar el riego regulado por déficit). Los resultados muestran que el algoritmo propuesto proporcionó un marco común que podría ser estandarizado bajo diferentes estrategias de riego, requiriendo solo los datos adquiridos y procesados por el mismo sistema y permitiendo cierto grado de tolerancia a fallas. En general, algunas ventajas que se pudo apreciar en el algoritmo fueron la rápida respuesta frente a diversos cambios en los distintos factores climáticos.

En el paper *Genetic algorithms for the sequential irrigation scheduling problem* propuesto por Arif. A Anwar [4], plantean que en trabajos publicados anteriormente, se utilizaron programación entera y heurísticas para resolver problemas de programación de riego secuencial. Sin embargo, tales problemas pertenecen a problemas de optimización combinatoria que se sabe que son computacionalmente exigentes (NP-hard). Por

lo tanto, solo se puede utilizar para resolver problemas relativamente pequeños, generalmente en un entorno donde se pueden asignar los recursos computacionales y tiempo necesarios para resolver un solo programa. Para aplicaciones prácticas, se deben utilizar métodos metaheurísticos de búsqueda local como algoritmos genéticos (GA), *simulated annealing* o *tabu search*. El artículo propone explorar el potencial de GA para resolver los problemas de programación de riego secuencial. Se presentan cuatro modelos de GA que modelan cuatro escenarios de riego secuencial diferentes.

En el artículo “*Predictive Irrigation Scheduling Modeling in Nurseries*” [13], se comenta que la asignación de requisitos de agua tiene un papel importante en la gestión de sectores y áreas verdes. Idealmente, los controladores de riego basados en la evapotranspiración pueden proporcionar riego de acuerdo con los requisitos de agua de la planta. El artículo describe la programación de riego predictivo con múltiples especies de cultivos y requisitos de agua de alta frecuencia con recursos limitados. Basado en datos históricos, el análisis de series de tiempo se usa para pronosticar la evapotranspiración, un elemento esencial en la ecuación del balance hídrico. Se propone un algoritmo basado en una investigación jerárquica que incluye reglas de prioridad y teniendo en cuenta las características del cultivo, el agua disponible y las restricciones de la red hidráulica para predecir los programas de riego, con el objetivo de minimizar los períodos de falta de agua y optimizar los recursos. Los resultados de la simulación con diferentes condiciones climáticas muestran la capacidad del modelo de series de tiempo para pronosticar la evapotranspiración, además que el enfoque predictivo propuesto para la programación del riego en comparación con el enfoque no predictivo permite prevenir la falta de agua en los cultivos.

Finalmente, se han hecho algunas propuestas para resolver este problema con técnicas de búsqueda local, tales como hormigas en el artículo *Optimization of irrigation scheduling using ant colony algorithms and an advanced cropping system model* [2] donde se desarrolla una programación de riego y de los fertilizantes adecuados para un terreno, donde el problema se representa en forma de árboles de decisión. Aquí se utiliza la optimización de colonias de hormigas (ACO), propuesto por M.Dorigo [6] como motor de optimización y se aplica un modelo de crecimiento de cultivos para evaluar la función de evaluación. El ajuste *Dynamic Decision Variable Option* (DDVO) [11] se utiliza para reducir el tamaño del espacio de búsqueda durante la generación de soluciones de prueba. Los resultados indican que esta técnica es capaz de identificar los programas de riego y fertilizantes que resultan en mejores rendimientos al usar menos agua en riego y fertilizantes que aquellos obtenidos usando la herramienta de Microsoft Excel basada en la hoja de cálculo Colorado Irrigation Scheduler (CIS) para cultivos anuales. Otra técnica usada para la planificación de riego son algoritmos genéticos, como lo muestra el artículo *Application of genetic algorithm for irrigation water scheduling* [17], donde se describe el desarrollo de un algoritmo genético para resolver un problema de programación del agua de riego. El objetivo es optimizar la utilización de los recursos hídricos en los sistemas de riego que funcionan de forma rotativa. La función objetivo se centra en optimizar la utilización de recursos hídricos a la vez que se minimizan las pérdidas de drenaje. El enfoque se aplicó a un sistema de pruebas simple y a uno más

complejo. Las soluciones se presentan utilizando un GA en diferentes formulaciones y comparaciones entre ellas. Los resultados muestran que los algoritmos genéticos son capaces de resolver problemas de programación de agua. Una aplicación al canal Pugal en el sistema de riego Indira Gandhi Nahar Pariyojana (IGNP) en el noroeste de India mostró que el enfoque es robusto y puede producir programas adecuados en condiciones extremas de estrés hídrico, concluyendo que el enfoque GA es una herramienta útil para la programación del agua en sistemas complejos.

CAPÍTULO 3

PROPUESTA DE SOLUCIÓN

En este capítulo se presenta el algoritmo propuesto para planificar rangos de horas y controlar la cantidad de agua a usar para regar los parques de una institución.

Antes de comenzar con la planificación se debe explicar como obtener la cantidad total de agua que se debe suministrar a los distintos terrenos. Esto se logra mediante la unión de las dos variables globales mencionadas anteriormente: La **evapotranspiración** y el **pronóstico de lluvia**.

3.1. Algoritmo de evapotranspiración

Para realizar el cálculo de la evapotranspiración se usará la ecuación de FAO Penman-Monteit presentada anteriormente en conjunto con supuestos y ecuaciones explicadas en Allen et al [3]:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

Si bien no se cuenta con valores de la mayoría de estas variables ya que son complejas de obtener, con las variables mencionadas en la descripción del problema (radiación, temperatura, entre otros) se puede estimar estos valores. Los indicadores para obtener la evapotranspiración para un día fijo son los siguientes:

- Temperatura mínima registrada durante el día.
- Temperatura máxima registrada durante el día.
- Humedad relativa máxima registrada durante el día.
- Humedad relativa mínima registrada durante el día.
- Velocidad del viento promedio registrada durante el día.
- Radiación promedio registrada durante el día.
- Número del día en el año.
- Latitud de la estación donde se extrajeron los datos.
- Elevación de la estación donde se extrajeron los datos.

A continuación se detalla como se calcula la fórmula (1) usando el valor de los indicadores anteriormente mencionados:

1. Δ , corresponde a la pendiente de la curva de presión de vapor. Δ se puede calcular como:

$$\Delta(T_{mean}) = \frac{4098 \cdot \left[0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{mean}}{T_{mean} + 237,3}\right) \right]}{(T_{mean} + 237,3)^2} \quad (2)$$

Donde T_{mean} es la temperatura media del aire. Para obtener este dato se puede usar el promedio entre la temperatura máxima y mínima:

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (3)$$

2. El siguiente término a determinar es la constante psicrométrica (δ). Esta se puede obtener mediante la siguiente función:

$$\delta(P) = 0,665 \cdot P \quad (4)$$

Donde P es la presión atmosférica medida en $[kPa]$. Este valor puede ser obtenido como:

$$P(z) = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right)^{5,26} \quad (5)$$

Donde z es la elevación sobre el nivel del mar donde se calculó dicha presión, el cual es un valor ingresado al algoritmo.

3. Se requiere además de los valores de la presión media de vapor de saturación e_s y la presión real de vapor e_a :

- e_s : Este valor surge del promedio entre la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire máxima y mínima:

$$e_s(T_{min}, T_{max}) = \frac{e^o(T_{min}) + e^o(T_{max})}{2} \quad (6)$$

Donde e^o es la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T , expresada como:

$$e^o(T) = 0,6108 \cdot \exp \left[\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3} \right] \quad (7)$$

- e_a : Existen distintas formas de obtener este término dependiendo de los datos disponibles que se tengan. Ya que se cuenta con los valores de la humedad relativa máxima y mínima y también las temperaturas máximas y mínimas, se puede calcular e_a como:

$$e_a(T_{min}, T_{max}, HR_{min}, HR_{max}) = \frac{e^o(T_{min}) \cdot \frac{HR_{max}}{100} + e^o(T_{max}) \cdot \frac{HR_{min}}{100}}{2} \quad (8)$$

Donde HR_{max} y HR_{min} son las humedades relativas máximas y mínimas respectivamente.

Con estos datos se puede obtener el déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$).

4. En cuanto al flujo del calor de suelo G . Para periodos diarios su magnitud bajo la superficie del terreno es cercana a 0, por lo cual puede ser despreciada:

$$G \approx 0 \rightarrow G = 0 \quad (9)$$

5. Finalmente nos falta obtener la radiación neta en la superficie del cultivo R_n . Se puede calcular mediante la resta entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}):

$$R_n(R_{ns}, R_{nl}) = R_{ns} - R_{nl} \quad (10)$$

- R_{ns} : Este dato viene dado por la siguiente fórmula:

$$R_{ns}(\alpha, R_s) = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (11)$$

Donde R_s es la radiación promedio registrada durante el día, y α es el coeficiente de reflexión del cultivo, el cual es 0,23 para efectos del terreno con el que se trabaja.

- R_{nl} : Para obtener la radiación de onda larga se puede usar la siguiente expresión:

$$R_{nl}(e_a, R_s, R_{so}, T_{max}, T_{min}, HR_{max}, HR_{min}) = \quad (12)$$

$$\sigma \cdot \left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14\sqrt{ea}) \cdot \left[1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right] \quad (13)$$

Aquí $T_{max,K}$ y $T_{min,K}$ son las temperaturas máximas y mínimas en grados kelvin respectivamente, σ es la constante de Stefan-Boltzmann [$4,903 \times 10^{-9} MJK^{-4}m^{-2} \text{ día}^{-1}$], ea es la función mencionada anteriormente y R_{so} es la radiación solar de un día despejado:

$$R_{so}(z, R_a) = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a \quad (14)$$

La radiación extraterrestre para periodos diarios (R_a) para cada día del año y para diversas latitudes se puede estimar a partir de la constante solar G_{sc} ($0,082 M J m^{-2} min^{-1}$), la declinación solar(δ) y la época del año:

$$\delta J = \delta(J), \quad (15)$$

$$dJ = d_r(J), \quad (16)$$

$$\omega s = \omega_s(\varphi, \delta), \quad (17)$$

$$R_a(\varphi, G_{sc}, \delta J, dJ, \omega s) = \quad (18)$$

$$\left(\frac{24 \cdot 60}{\pi} \right) \cdot G_{sc} \cdot dJ \cdot (\omega s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta J) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta J) \cdot \sin(\omega s)) \quad (19)$$

Donde d_r es la distancia relativa inversa Tierra-Sol, φ es la latitud de la estación donde se tomaron los datos y ω_s es el ángulo de radiación a la puesta del sol. A continuación se muestra como obtener cada uno de estos términos:

$$\delta(J) = 0,409 \cdot \sin \left(\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \right) \cdot J - 1,39 \right) \quad (20)$$

$$d_r(J) = 1 + 0,033 \cdot \cos \left(\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \right) \cdot J \right) \quad (21)$$

$$\omega_s(\varphi, \delta) = \arccos [-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (22)$$

Donde J es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

Para resumir, se presenta un pseudocódigo de los cálculos explicados anteriormente:

Algorithm 1: et0_algorithm_fao56

Data: T_{min} , T_{max} , HR_{min} , HR_{max} , u_2 , R_s , J , φ , z

Function et0_algorithm_fao56(T_{min} , T_{max} , HR_{min} , HR_{max} , u_2 , R_s , J , φ , z):

```

 $\alpha \leftarrow 0,23;$ 
 $T_{mean} \leftarrow \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right);$ 
 $p \leftarrow P(z);$ 
 $d \leftarrow \Delta(T_{mean});$ 
 $g \leftarrow \delta(p);$ 
 $es \leftarrow e_s(T_{min}, T_{max});$ 
 $ea \leftarrow e_a(T_{min}, T_{max}, HR_{min}, HR_{max});$ 
 $es\_ea = es - ea;$ 
 $dJ \leftarrow r(J);$ 
 $\delta J \leftarrow \delta(J);$ 
 $\omega S \leftarrow \omega_s(\varphi, \delta);$ 
 $Ra \leftarrow R_a(\varphi, G_{sc}, \delta J, dJ, \omega S);$ 
 $Rso \leftarrow R_{so}(z, Ra);$ 
 $Rnl \leftarrow R_{nl}(e_a, R_s, R_{so}, T_{max}, T_{min}, HR_{max}, HR_{min});$ 
 $Rns \leftarrow R_{ns}(\alpha, R_s);$ 
 $Rn \leftarrow R_n(Rns, Rnl);$ 
 $tmp_1 \leftarrow 0,408 \cdot d \cdot Rn;$ 
 $tmp_2 \leftarrow \gamma \cdot \left( \frac{900}{T_{mean} + 273} \right) \cdot u_2 \cdot es\_ea;$ 
 $tmp_3 \leftarrow d + g \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2);$ 
return  $\frac{tmp_1 + tmp_2}{tmp_3}$ 

```

Donde:

- T_{min} : Temperatura mínima registrada durante el día.
- T_{max} : Temperatura máxima registrada durante el día.
- HR_{max} : Humedad relativa máxima registrada durante el día.
- HR_{min} : Humedad relativa mínima registrada durante el día.
- u_2 : Velocidad del viento promedio registrada durante el día.
- R_s : Radiación promedio registrada durante el día.
- J : Número del día en el año.
- φ : Latitud de la estación donde se extrajeron los datos.
- z : Elevación de la estación donde se extrajeron los datos.

Todos los elementos, excepto J , φ y z son listas de 24 elementos que contienen los valores de las distintas variables a una hora en particular. Sin embargo, para efectos de

esta memoria se busca obtener este valor a partir de las 22:00 en adelante, debido a las condiciones de la empresa y a que en esa hora pocas personas transitan por el parque. Los datos fueron extraídos de una página externa, por lo que a partir de dicha hora solo se tienen 21 datos (desde las 00:00 hasta las 21:00 hrs), por lo que nos faltarán 3 datos para poder obtener la evapotranspiración.

J , ε y z son datos estáticos que no cambian para efectos del algoritmo. No obstante, los demás valores si dependerán del clima. Para los datos T_{max} , T_{min} , HR_{max} y HR_{min} , se tomará como supuesto que los datos restantes serán muy cercanos a alguno de los datos ya almacenados en cada lista, o que estos datos no serán ni los máximos ni los mínimos y por ende serán omitidos.

En el caso de la lista que contiene las u_2 , estos datos al estar en $\left[\frac{m}{s}\right]$ son bastante cercanos a 0, por lo que aproximar los últimos 3 datos a 0 es un supuesto razonable.

Finalmente la R_s en la noche siempre es 0 a causa de la ausencia del sol en esas horas.

Para esto se muestra un gráfico de comparación entre el algoritmo propuesto con los supuestos indicados anteriormente y la evapotranspiración real con los 24 datos, calculada usando data desde 26/03/2019 al 27/05/2019 (62 datos) y usando como sector la plaza Santa Teresa de Colina:

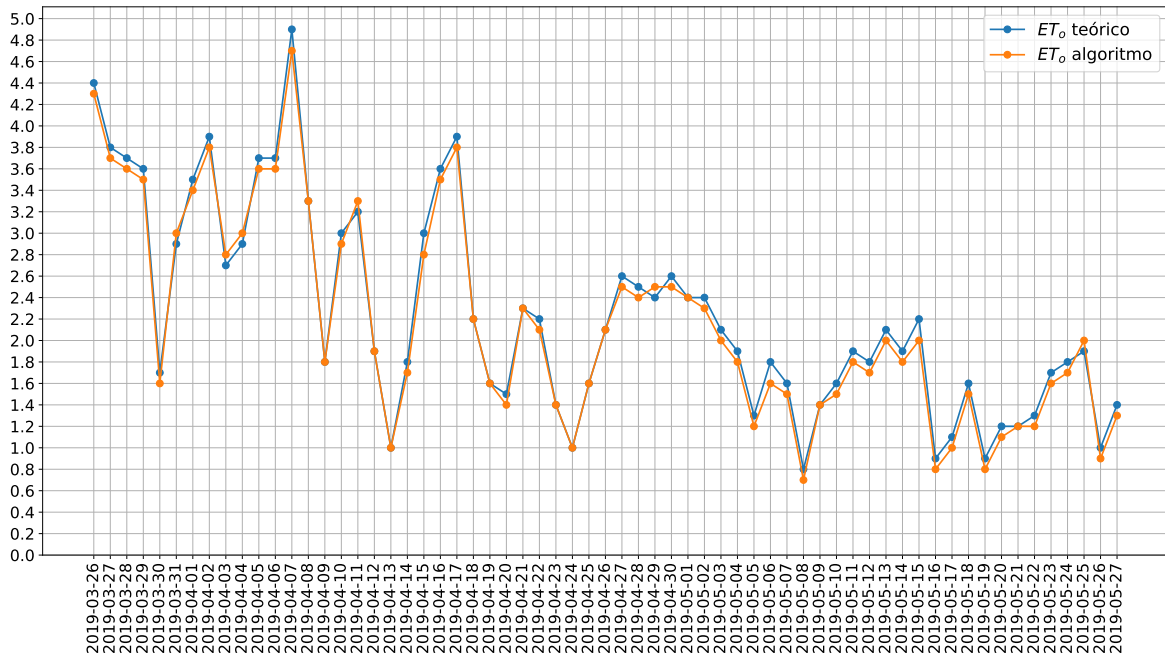


Figura 4: Comparación entre evapotranspiración usando los 24 datos (ET_o teórico) y usando los 21 datos disponibles hasta las 21:00 (ET_o algoritmo)

Se puede apreciar en la figura 4 que ambos gráficos son bastantes similares. Sin embargo, para respaldar esta afirmación se muestra a continuación un histograma del error absoluto entre ambos valores para cada fecha:

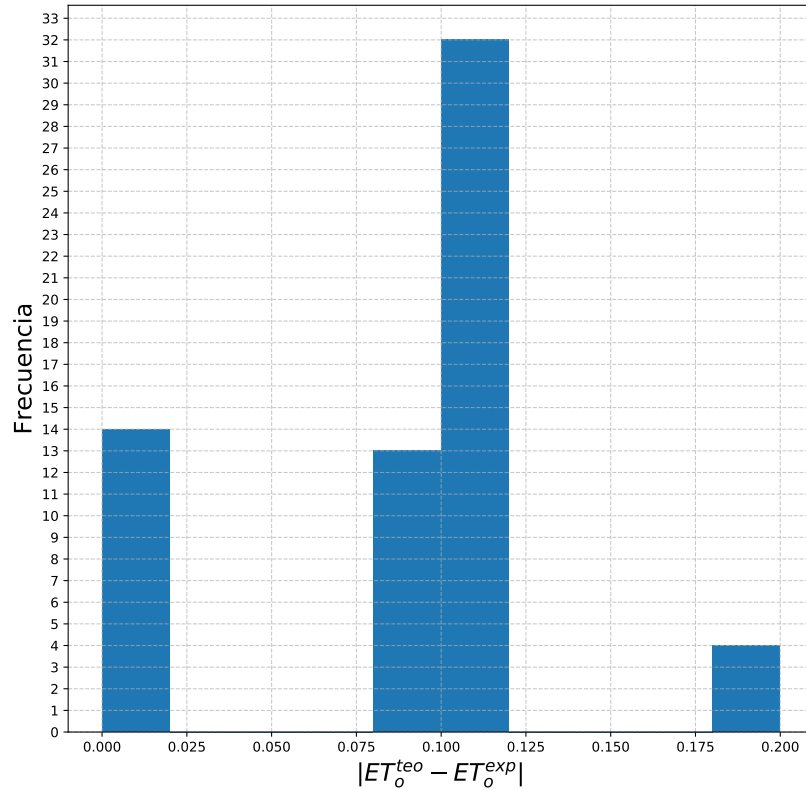


Figura 5: Histograma del error absoluto entre evapotranspiración usando los 24 datos (ET_o teórico) y usando los 21 datos disponibles hasta las 21:00 (ET_o algoritmo)

Observando la figura 5 se tiene que la mayoría de los datos se concentran entre 0 y 0,1, siendo un error aceptable teniendo en cuenta las aproximaciones que se realizaron, por lo que se puede asumir como correctos los supuestos indicados anteriormente.

A continuación se presenta el algoritmo general de planificación. Este algoritmo se divide en dos partes: extracción de datos junto con cálculo de evapotranspiración, y cálculo de agua total junto con tiempo de riego.

3.2. Primera parte del algoritmo de planificación

Antes de comenzar a extraer datos, necesitamos conocer la distancia de cada estación de datos meteorológicos a un parque en particular, y escoger la más cercana (distancia más pequeña), y realizar este procedimiento para todos los parques de cada institución. Al ser distancias ubicadas en un mapa geográfico debemos considerar que la tierra tiene cierta curvatura entre dos puntos. Por este motivo usaremos la distancia de vincenty [15] [9] entre dos puntos para determinar cuál estación está más cercana a un parque:



Figura 6: Distancia de vincenty entre Londres y Beijing

En la figura 6 se observa un ejemplo de cómo se interpreta dicha distancia. Aquí se toma como supuesto que la tierra es un elipsoide en vez de una esfera, pudiendo así precisar el cálculo de dicha distancia. Cabe destacar que este método iterativo puede fallar si se calculan distancias con dos puntos casi antípodales, que no será nuestro caso, ya que las distancias son a nivel regional. Se muestra en la figura 7 un ejemplo de las distancias de vincenty de algunas estaciones con respecto a la Plaza Santa Teresa ubicada en la municipalidad de Colina:

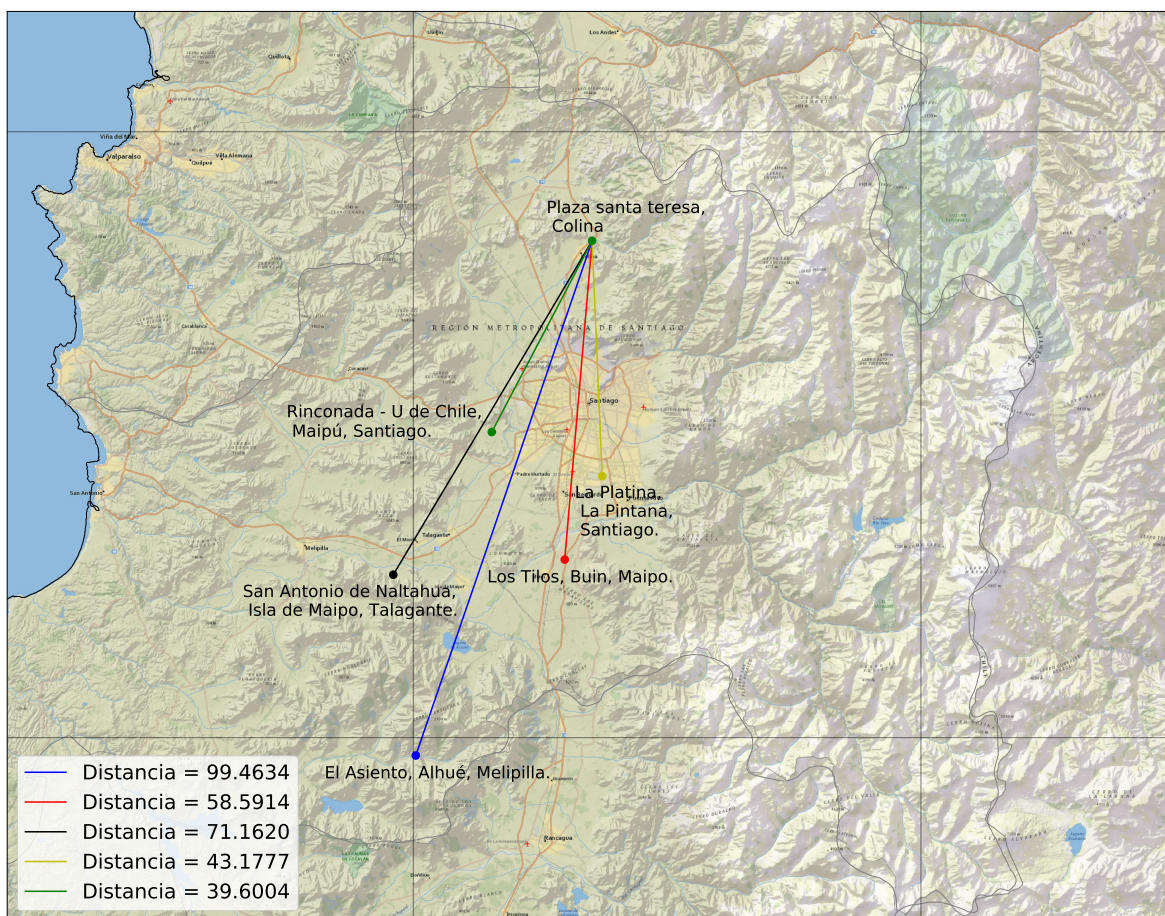


Figura 7: Distancias vincenty de distintas estaciones a plaza Santa Teresa en Colina

Se observa tanto visual como numéricamente en la figura 7 que la distancia más corta a la plaza mencionada es la estación ubicada en Rinconada, Maipú, Santiago, por lo que la plaza Santa Teresa usará la información climatológica proporcionada por este sitio. Para esto, se pedirá un *request* de todos los datos necesarios y disponibles para poder calcular la evapotranspiración a partir de las 00:00 horas hasta las 21:30 aproximadamente, ya que a esa hora se encontrarán los 21 datos que se usarán para el cálculo dicho número. Por otra parte, se pide un *request* del pronóstico de la cantidad de agua en [mm] por metro cuadrado que caerá al día siguiente de efectuar el riego en el parque a otro proveedor mencionado posteriormente.

3.3. Segunda parte del algoritmo de planificación

Una vez calculada la ET_o y el pronóstico de la lluvia, para obtener el volumen total de agua a regar se itera por todos los sector de cada área verde de una organización, pidiendo la resta de estos 2 valores, multiplicando previamente ET_o por el factor K_c de cada área verde, para luego sumarle la lluvia y pasando el resultado a litros. Sin

embargo, en algunos casos la presión de un sector de riego es muy baja, por lo que el aspersor tarda en iniciarse. Para estos casos, se define un factor de estrés s_f cuya función es darle más tiempo de riego al sector. Este factor es 1 para casos normales:

$$\text{Volumen} : (((ET_o \cdot K_c) - \text{lluvia})[mm] \cdot 0,001 \left[\frac{m}{mm} \right] \cdot \text{area terreno}[m^2]) \cdot 1000 \left[\frac{L}{m^3} \right] \cdot s_f \quad (23)$$

El resultado de la fórmula entrega el volumen (en litros) que se debe regar por sector. Por otra parte, los valores de flujo de cada sector son medidos mediante sensores de flujo y presión. Teniendo estos datos, se puede obtener el tiempo (en minutos) de riego como la división entre la cantidad de agua total a regar por sector y el flujo de cada válvula:

$$\text{Tiempo de riego}_{ijk} = \frac{\text{Volumen}_{ijk} \left[\frac{L}{min} \right]}{\text{Flujo}_{ijk} \left[\frac{L}{min} \right]} \quad (24)$$

donde i representa la organización, j el área verde y k el sector. Con el tiempo de riego, se puede planificar la cantidad de agua a regar por sector. Este rango parte de una determinada hora h_i y termina a una hora final h_f , ambos con formato hh:mm. Ya que se tiene el total en minutos, se puede dividir esta cantidad en p partes iguales de forma de regar uniformemente el parque y así no colapsar un terreno con riego constante. Si el total de tiempo a regar t_{riego} es igual a la resta entre h_f y h_i ($t_{riego} = h_f - h_i$) entonces $p = 1$, ya que no se tiene espacio extra para dividir el riego. Si ($t_{riego} > h_f - h_i$) se muestra una alerta al cliente notificando que el rango de horas es muy corto y que no se podrá suministrar la cantidad óptima de agua al parque. Quedará entonces a decisión del cliente si aumenta o no este rango. En caso de no aumentarlo se regará $h_f - h_i$ minutos. Sin embargo, en la mayoría de los casos se tendrá ($t_{riego} < h_f - h_i$), por lo que se podrá particionar el tiempo de riego. Para esto, primero se requiere saber la holgura de riego que se tiene mediante la resta $t' = (h_f - h_i) - t_{riego}$. Luego, este valor se divide por la cantidad p de particiones para saber el tiempo entre riegos $\left(\frac{t'}{p} \right)$. Siendo así, se comienza regando a la hora h_i un total de $\frac{t_{riego}}{p}$. Una vez terminado este instante de riego, el segundo momento a regar sería $h_i + \frac{t_{riego}}{p} + \frac{t'}{p}$, el tercer momento será $h_i + 2 \cdot \frac{t_{riego}}{p} + \frac{t'}{p}$ y así sucesivamente.

CAPÍTULO 4

VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Para la extracción de datos globales de la aplicación se contó con el apoyo de dos API's climatológicas Agromet y Meteored:



(a) Logo de Agromet



(b) Logo de Meteored

Figura 8: Logo de API's de datos globales

- **Agromet:** Con el objetivo de facilitar a diferentes clientes el acceso a información agroclimática oportuna y consolidada, el Ministerio de Agricultura ha conformado la Red Agroclimática Nacional (RAN), la cual a través de su plataforma Agromet entrega este tipo de información de manera uniforme, consistente y a nivel de todo el país.

Todas las estaciones meteorológicas automáticas que aportan información a Agromet son equipos automáticos de última tecnología que recogen la información climática las 24 horas del día mediante sensores específicos y la transmiten a través de comunicación satelital a servidores que efectúan el procesamiento de información para entregarla a través de la web.

Las estaciones se encuentran ubicadas en áreas productivas de distintos rubros en las principales comunas agrícolas de Chile. La información agroclimática se actualiza en forma horaria y se encuentra disponible las 24 horas, en acceso sin restricciones y sin costo.

- **Meteored:** Meteored es una API que pronostica la lluvia, nieve, entre otros factores climáticos diariamente. Actualmente tiene más de 25 portales web en todo el mundo, así como aplicaciones nativas para diferentes plataformas. Meteored posee pronósticos y mapas para todo el mundo usando los mejores modelos de predicción como ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) el cual es un modelo numérico de predicción del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas.

El código del algoritmo fue desarrollado en Python 3,7 junto a la librería NumPy [12], [14] debido a su gran sencillez, baja curva de aprendizaje el cual se traduce en que nuevos integrantes pueden adaptarse fácilmente al código, y la gran afinidad y buena documentación que tiene con la base de datos no relacional InfluxDB [10], donde

se guardan los datos globales y locales de los parques. Por otra parte, el producto es presentado al usuario mediante una página web

El algoritmo fue probado inicialmente en la Plaza Santa Teresa de la Municipalidad de Colina en Santiago de Chile, donde se hicieron ciertas mejoras al proyecto en general. Posterior a esto el proyecto fue lanzado oficialmente en la Plaza Arturo Prat de la comuna de Puente Alto de la misma región. El proyecto demostró tener potencial, mostrando un buen control y planificación de riego dado los datos climáticos recopilados y teniendo un buen desempeño de ahorro a nivel de litros de agua consumidos, los cuales se mostrarán posteriormente.

El algoritmo es ejecutado a las 21 : 30 diariamente, y una vez resuelto la interfaz visual de control con la que cuenta smartDrop muestra al usuario la planificación de riego dados los resultados del código. La página principal de una organización es la siguiente:

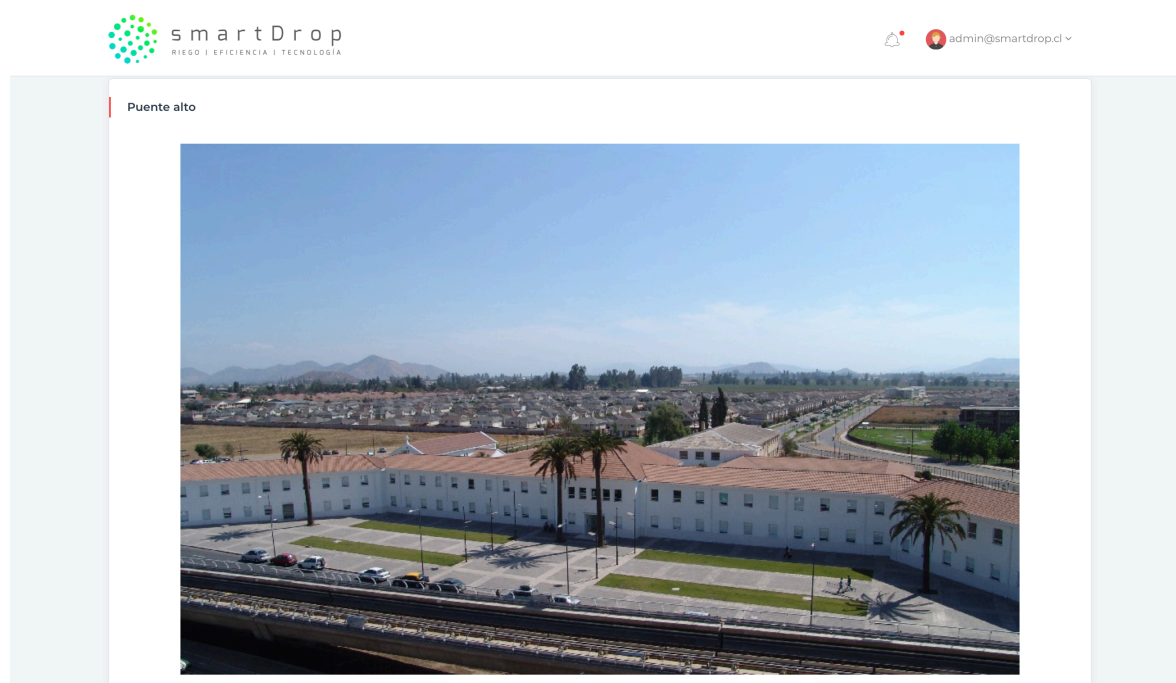


Figura 9: Imagen principal de la página

Esta vista nos muestra una imagen previa de la organización (figura 9), seguido de las áreas verdes con las que cuenta dicha institución (figura 10).

Al acceder a una área verde en particular se despliega las siguientes informaciones.

La figura 11 nos presenta la pantalla principal que nos muestra un mapa general de la zona, colocando en rojo los sectores que posee dicha área verde. Además, se despliega al usuario un listado de los sectores mostrados en el mapa (figura 12), con el estado en el que se encuentra el nodo y las opciones pertinentes. Al ver la data que almacena cada nodo se verá la siguiente vista (figura 13):

El detalle muestra dos gráficos: El primero mostrando la curva duración de riego (en minutos) vs el día en el que se efectuó dicho riego. Esto quiere decir que en un día i

ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN DE RIEGO DE ÁREAS VERDES

Lista de áreas verdes

CREAR NUEVA ÁREA VERDE

Show 10 entries Search:

Nombre	ID Lora	Opciones
Plaza Arturo Prat	2	VER EDITAR

Showing 1 to 1 of 1 entries

Previous 1 Next

Figura 10: Listado de áreas verdes

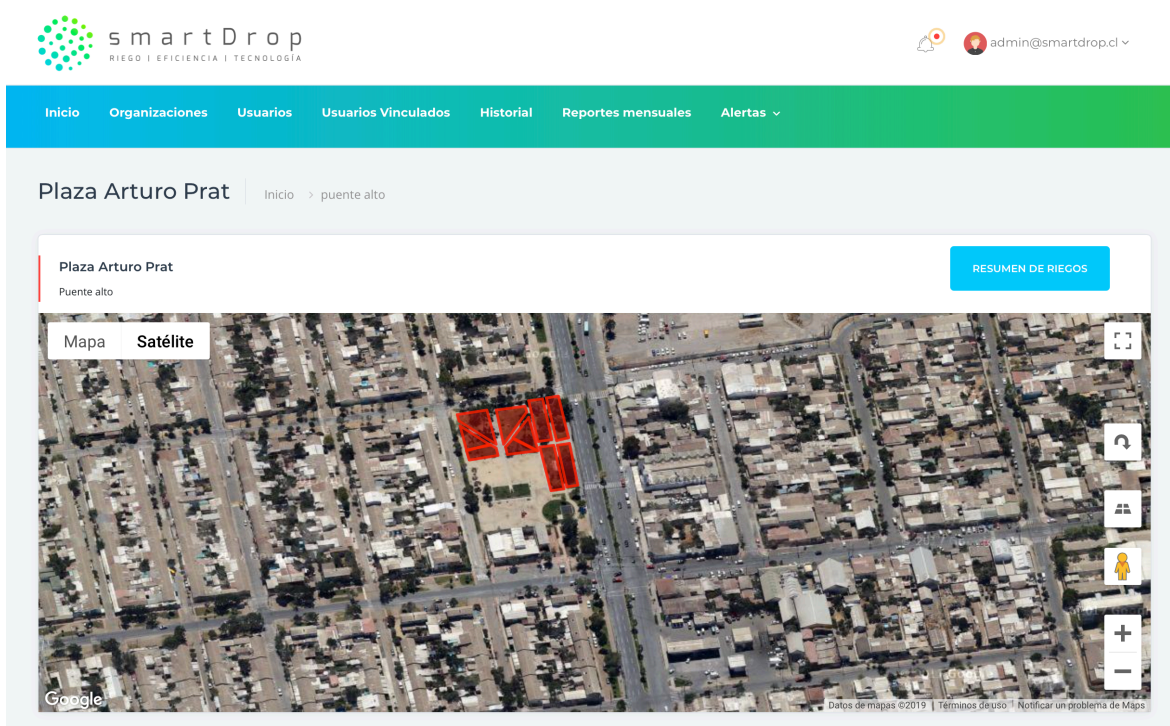


Figura 11: Información principal de un área verde

particular la duración del riego fue de j [mins]. El segundo gráfico muestra la cantidad de volumen de riego efectivo (en litros) vs el día donde se realizó la irrigación.

Por otra parte, en la Figura 12 se presenta también la opción “Resumen Sectores”, la cual despliega la siguiente información acerca de todos los sectores (figura 14):

ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN DE RIEGO DE ÁREAS VERDES

Lista de Sectores

RANGOS DE MODO AUTOMÁTICO CAMBIAR A MODO MANUAL RESUMEN SECTORES CREAR NUEVO SECTOR

Show 10 entries Search:

Nombre	Nodo	Estado	Opciones
Sector 1	NODO PROGRAMADOR 1	Normal	VER DATA EDITAR ELIMINAR
Sector 10	NODO PROGRAMADOR 1	Normal	VER DATA EDITAR ELIMINAR
Sector 2	NODO PROGRAMADOR 1	Normal	VER DATA EDITAR ELIMINAR
Sector 3	NODO PROGRAMADOR 1	Normal	VER DATA EDITAR ELIMINAR
Sector 4	NODO PROGRAMADOR 1	Normal	VER DATA EDITAR ELIMINAR
Sector 5	NODO PROGRAMADOR 1	Normal	VER DATA EDITAR ELIMINAR
Sector 6	NODO PROGRAMADOR 1	Normal	VER DATA EDITAR ELIMINAR

Figura 12: Listado de sectores de un área verde

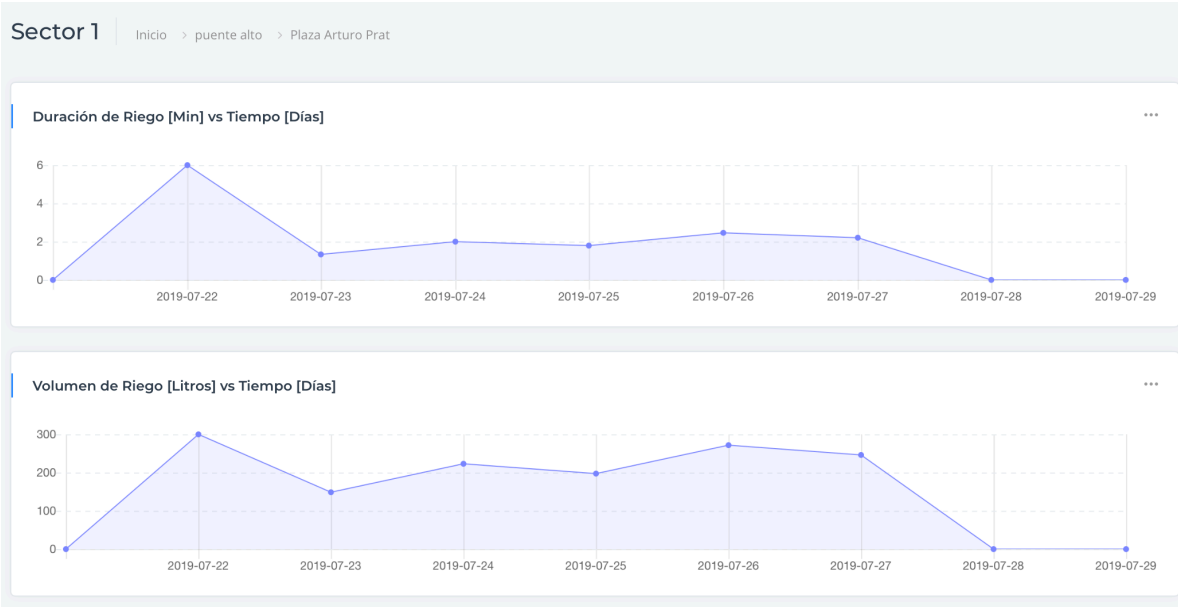


Figura 13: Detalle de un nodo en particular

Esta vista muestra un resumen del volumen total de riego y la duración total efectiva, además del comienzo y la duración de riego por sector, teniendo una vista general de todos los sectores.

Por otra parte, en la sección “Reportes mensuales” en la Figura 12, se accede a un

ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN DE RIEGO DE ÁREAS VERDES

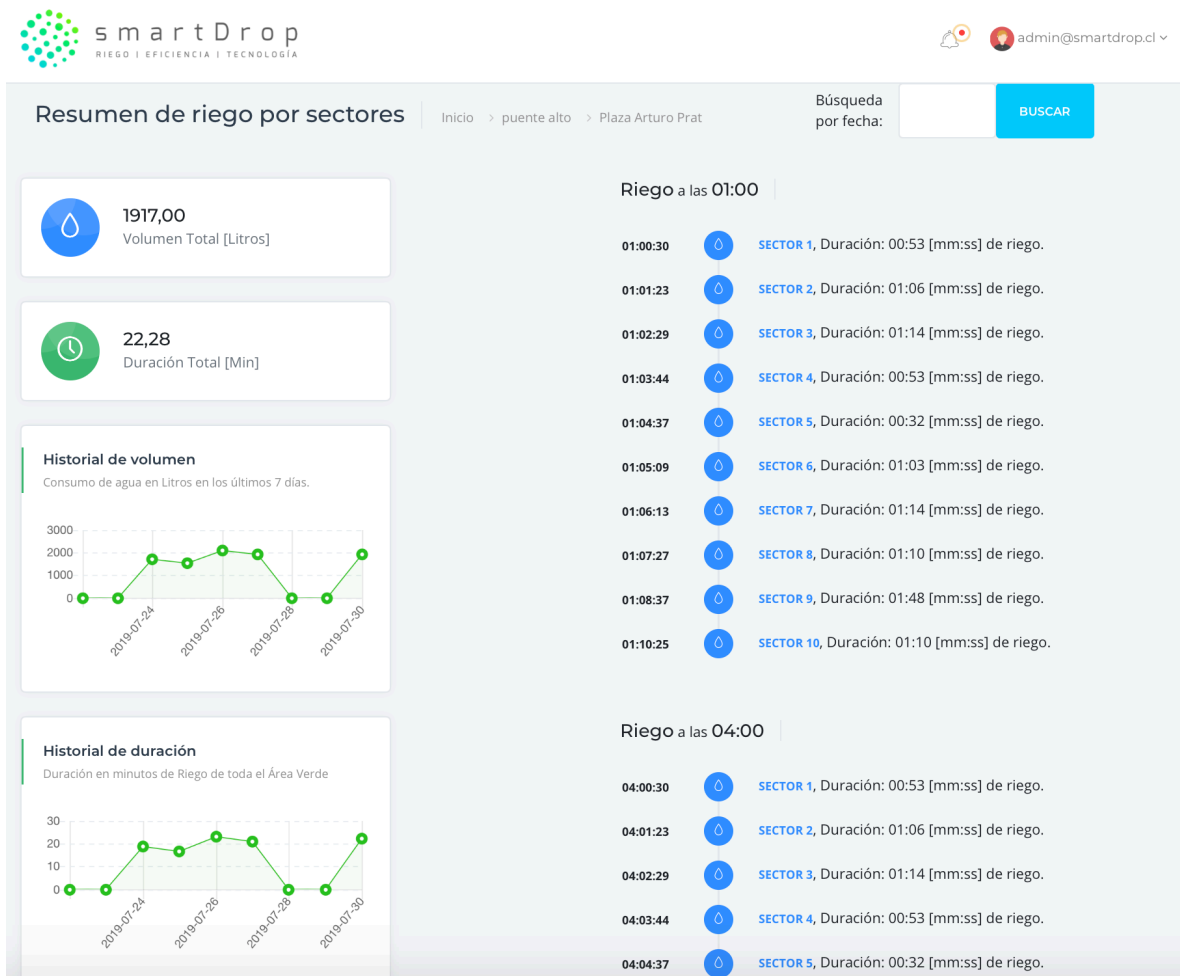


Figura 14: Resumen de riego por sectores

resumen completo y detallado del riego efectuado por mes (figura 15):



Figura 15: Reporte por mes de área verde

Se puede apreciar la cantidad de metros cúbicos consumidos por todos los sectores, la presión promedio, el número de sectores, entre otros elementos. Además, se puede observar un reporte por día del área verde, mostrando gráficos de como varía el consumo de agua, el tiempo de riego, la evapotranspiración, la temperatura máxima y mínima y el pronóstico del día (figuras 16 y 18).

ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN DE RIEGO DE ÁREAS VERDES

Reporte por día de Plaza Arturo Prat

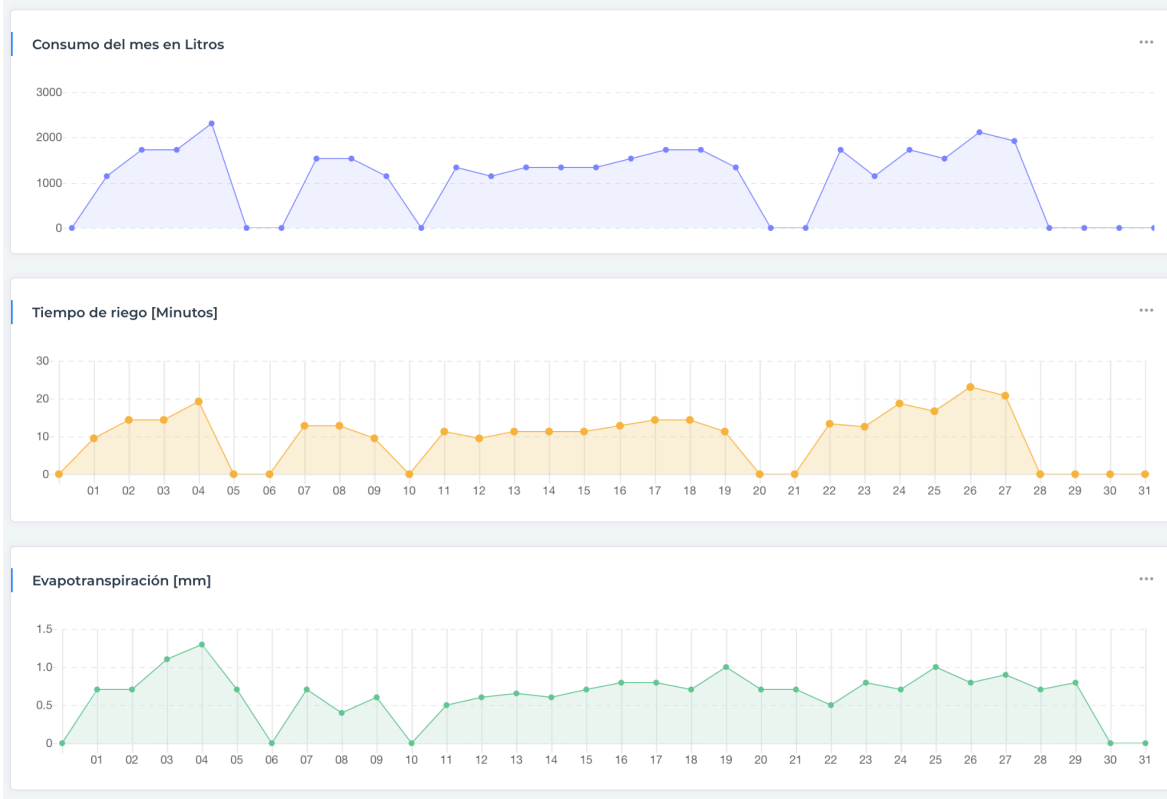


Figura 16: Gráficas de consumo de agua, tiempo de riego y evapotranspiración

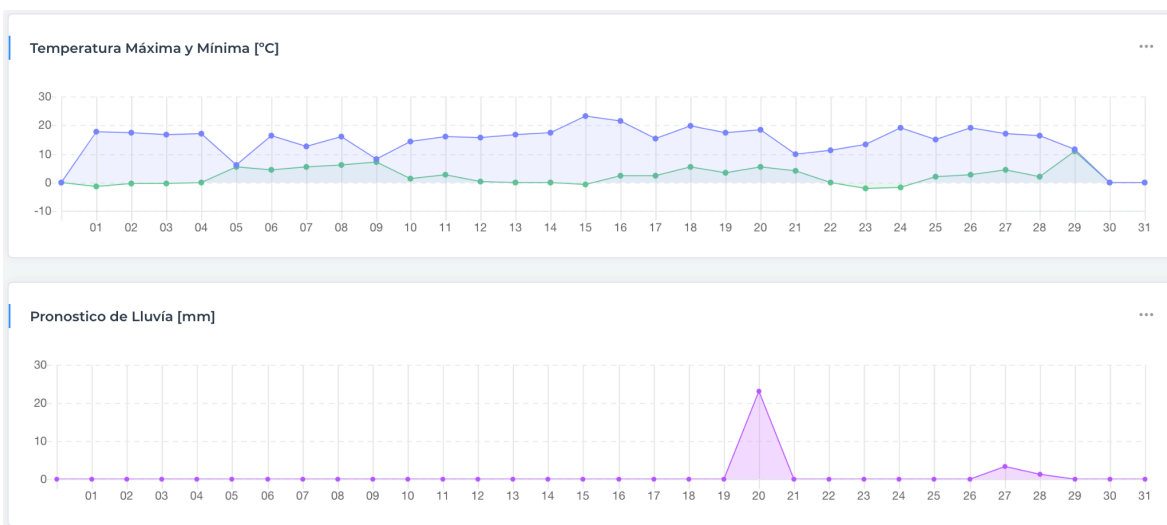


Figura 17: Gráficas de temperatura y pronóstico de lluvia

De esta manera, el usuario tiene un total control por sector de la cantidad de agua que está siendo utilizada en cada sector y de manera global en toda el área verde, teniendo

control de el agua consumida por todas sus áreas verdes. Respecto al ahorro de agua, se cuenta con los siguientes datos de los años 2018 y el 2017 del mes de Junio, Julio y Agosto:

Mes	Año	Consumo de agua total [m^3]	Consumo de agua por día [$\frac{m^3}{\text{día}}$]	Porcentaje de ahorro [%]
Junio	2017	50	1,7	47
	2018	50	1,7	47
	2019	26,45	0,9	-
Julio	2017	69	2,3	22
	2018	276	9,2	80
	2019	57	1,8	-
Agosto	2017	65	2,1	14
	2018	67	2,2	18
	2019	55	1,8	-

Tabla 1: Resumen de resultados de algoritmos en los meses Junio, Julio y Agosto.

- La primera columna corresponde a los meses donde fue probado el algoritmo sobre el área verde de la municipalidad de Puente Alto en Santiago.
- La segunda columna corresponde a los años donde se extrajeron los datos, correspondientes a los años 2017, 2018 y 2019.
- La tercera columna corresponde al total de agua en metros cúbicos consumidos.
- La cuarta columna es el consumo de agua total dividido en 30 (aproximadamente el total de días de un mes), lo cual nos indica el consumo de agua por día (metros cúbicos por día).
- Finalmente la última columna es el porcentaje de ahorro comparado con este año 2019.

Se puede apreciar por la Tabla 1 que en todos los años se tuvo un ahorro de agua con respecto a los años 2018 y 2017 en todos los meses donde se probó el código, además que el algoritmo junto con la página web nos muestra un total control de riego de los diferentes sectores donde se encuentran los aspersores. Se puede observar particularmente el año 2018 , el cual obtuvo un importante ahorro de agua del 80 %, mientras que comparándose con el año 2017 se tiene un ahorro del 20 % de agua, obteniendo un ahorro aproximado del 50 %.

Se presenta además los *boxplots* del consumo de agua en m^3 en los meses mencionados anteriormente:

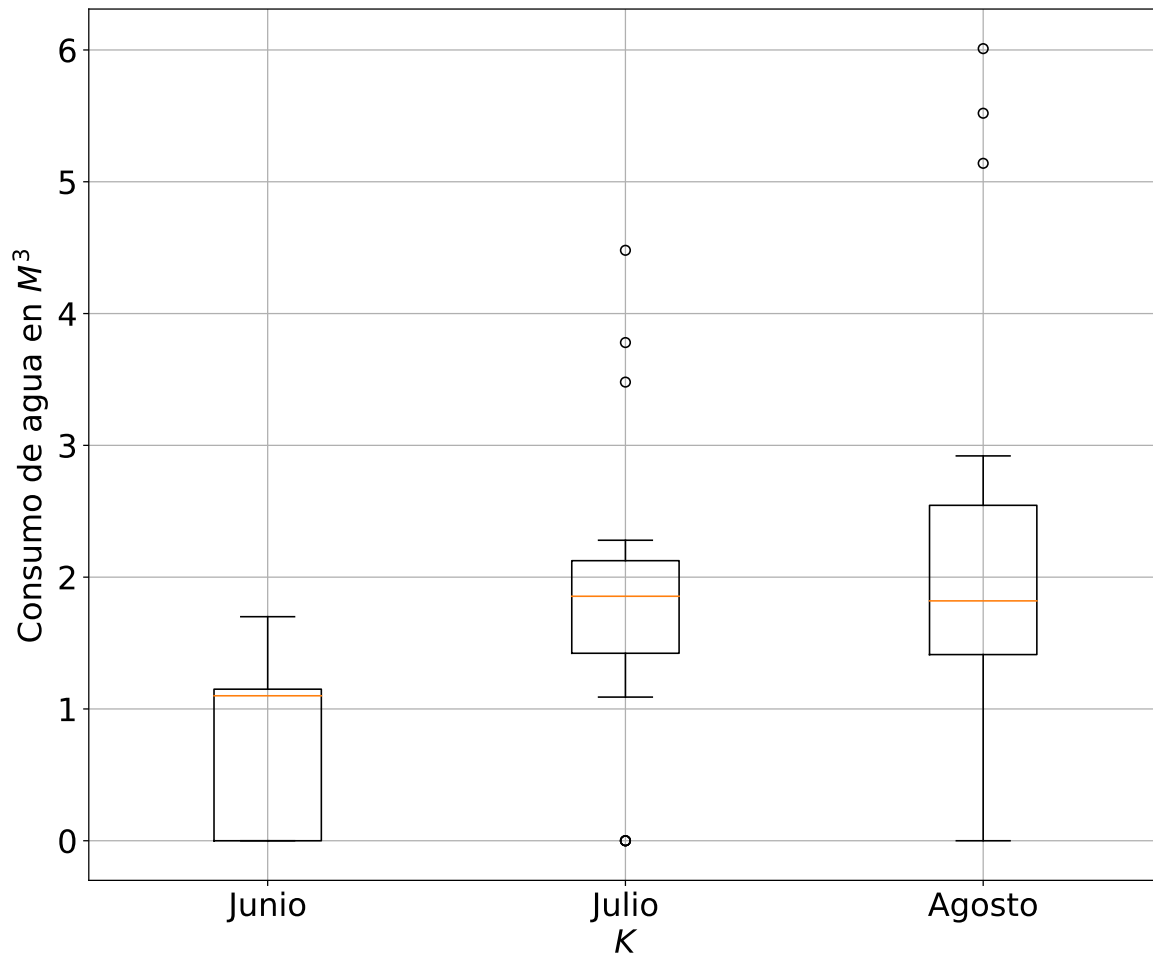


Figura 18: *Boxplots* del consumo de riego de los meses donde fue ejecutado el algoritmo.

Se puede observar que en Julio y Agosto el consumo de agua fue mayor al de Junio debido a que en este mes en particular la cantidad de lluvia en la región fue mayor en comparación a los otros períodos. En general, los riegos tuvieron poca dispersión, manteniéndose constantes en el tiempo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente trabajo se explicó en detalle el funcionamiento e implementación de un algoritmo de planificación para el riego de sectores verdes. Se logró construir en base a un conjunto de variables básicas y sencillas de obtener (temperaturas máximas y mínimas, velocidad del viento, radiación media, velocidad del viento, entre otros) una serie de pasos de rápida ejecución que logra entregar con buena precisión los tiempos de riego necesarios que cada cada válvula de riego debe funcionar para que una organización pueda mantener bien cuidado y en buen estado sus áreas verdes. Se logró implementar este algoritmo en la municipalidad de Puente Alto en Santiago en el año 2019, probando así con un caso real el funcionamiento de este algoritmo en los meses de junio, julio y agosto, probando tener éxito en todos los meses mencionados. Esto quiere decir que se logró controlar el consumo de agua, teniendo un resumen estadístico de la cantidad de agua que se ocupó mensualmente en detalle, además de otros indicadores como el tiempo de riego, el pronóstico de lluvia del sector, entre otros.

El algoritmo requiere de varios indicadores para su funcionamiento, entre los cuales se tiene datos climáticos como radiación de la zona, temperaturas máximas y mínimas, pronósticos de lluvia entre otros como datos globales, así como también se debe conocer el área de riego, el flujo de cada aspersor de agua, conocer el tipo de cultivo de las zonas a regar para conocer así su coeficiente de cultivo. Esto es un factor clave al momento de plantear el trabajo futuro, debido a que si uno de estos datos no puede ser entregado o falla debido a un problema del proveedor, se debe implementar otro tipo de modelo que ayude a suplir esta información.

Como trabajo futuro hay varias alternativas que se pueden implementar. Un primer avance importante es implementar el algoritmo en otras instituciones tales como colegios o universidades, estadios de fútbol u otras instituciones que cuenten con áreas verdes, con tal de analizar el desempeño del proyecto en otros ambientes. Además, sería de suma utilidad poder observar el comportamiento en otras regiones de Chile, tales como regiones del norte como Iquique o Arica donde el clima es más seco y con probabilidades casi nulas de lluvia, como en el sur en regiones como Concepción donde la posibilidad de lluvia es muy alta.

Como segunda opción el proyecto cuenta con una base de datos que almacena la cantidad de agua a regar diariamente, además de los datos climáticos necesarios para obtener la ET_k cada día, la evapotranspiración correspondiente y el pronóstico de lluvia, esto con el fin de poder generar a futuro gráficos y estadísticas de la cantidad de agua usada para regar todos los sectores verdes de una organización, con el fin de entregar mayor información al usuario del gasto total de agua realizado para mantener bien cuidado su área verde. Esto tiene como objetivo poder indicarle al cliente si es conveniente seguir manteniendo su área verde o reducir la cantidad de terreno a irrigar, distribuir de mejor manera las válvulas de riego de cada área verde (modificar su ubicación, agregar o disminuir la cantidad de aspersores), entre otros.

El algoritmo debe recibir como *input* los datos climáticos necesarios para calcular la ET_o además del pronóstico de lluvia. A diferencia de los datos locales, esta información depende de proveedores externos. Sin embargo, si alguno de estos datos no puede ser entregado el algoritmo no podrá calcular los tiempos de riego, por lo que almacenar datos históricos tiene como segundo objetivo poder pronosticar en base a series de tiempo los datos climáticos de una organización, con el fin de no depender totalmente de un proveedor externo para el funcionamiento del algoritmo.

Con lo anterior se concluye que este es un algoritmo base, lo cual quiere decir que posee mucha escalabilidad en el futuro, pudiendo así controlar de forma más eficiente el flujo de agua en sectores verdes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64(1):81 – 110, 1993.
- [2] Optimization of irrigation scheduling using ant colony algorithms and an advanced cropping system model. *Environmental Modelling & Software*, 97:32 – 45, 2017.
- [3] R.G. Allen. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. 2006.
- [4] Arif A. Anwar and Zia Ul Haq. Genetic algorithms for the sequential irrigation scheduling problem. *Irrigation Science*, 31(4):815–829, Jul 2013.
- [5] Jaume Casadesús, Mercè Mata, Jordi Marsal, and Joan Girona. A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 83:11 – 20, 2012.
- [6] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colorni. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1):29–41, Feb 1996.
- [7] Marvin Eli Jensen, Robert D Burman, and Rick G Allen. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE, 1990.
- [8] Hamlyn G Jones. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of experimental botany*, 55(407):2427–2436, 2004.
- [9] Charles FF Karney. Algorithms for geodesics. *Journal of Geodesy*, 87(1):43–55, 2013.
- [10] Dominik Leutnant. *influxdb: R Interface to InfluxDB*, 2018. R package version 0.14.2.
- [11] G Naadimuthu, KS Raju, and ES Lee. A heuristic dynamic optimization algorithm for irrigation scheduling. *Mathematical and computer modelling*, 30(7-8):169–183, 1999.
- [12] Travis Oliphant. *Guide to NumPy*. 01 2006.
- [13] Rousseau Tawegoum, Florian Leroy, Gérard Sintès, and Gérard Chassériaux. Predictive irrigation scheduling modeling in nurseries. In Suren Kulshreshtha and Amin Elshorbagy, editors, *Current Perspective on Irrigation and Drainage*, chapter 2. IntechOpen, Rijeka, 2017.
- [14] S. van der Walt, S. C. Colbert, and G. Varoquaux. The numpy array: A structure for efficient numerical computation. *Computing in Science Engineering*, 13(2):22–30, March 2011.

- [15] T. Vincenty. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. *Survey Review*, 23(176):88–93, 1975.
- [16] Dingbao Wang and Ximing Cai. Irrigation scheduling—role of weather forecasting and farmers’ behavior. *Journal of Water Resources Planning and Management-asce - J WATER RESOUR PLAN MAN-ASCE*, 135, 09 2009.
- [17] Robin Wardlaw and Kampanad Bhaktikul. Application of genetic algorithm for irrigation water scheduling. *Irrigation and Drainage*, 53:397 – 414, 12 2004.