



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE
REGISTROS DE PRESIONES EN UN SISTEMA
DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Armenta Ortega Isaí

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Faustino de Luna Cruz



Ciudad Universitaria, CDMX, FEBRERO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi profunda gratitud a las siguientes personas que han sido fundamentales en mi trayectoria académica y personal:

A mi querida madre, la persona más importante en mi vida. Tu presencia constante y apoyo incondicional han sido importantes para que yo siga adelante en mi camino. Gracias por ser mi roca y por alentarme en cada paso que he dado. Te amo tres millones.

A mi querido padre, por ser mi respaldo desde el inicio de mi decisión sobre dónde estudiar, tu dedicación en procurar mi bienestar y educación, y por ser un ejemplo de esfuerzo y sacrificio.

A mi familia, mi abuela, mi tía y mi tío, por confiar en mí y brindarme su apoyo inquebrantable. Su presencia y aliento han sido muy especiales.

A todos mis seres queridos, a pesar de la distancia física, gracias por estar siempre presentes en mi mente y corazón, su amor ha sido mi impulso.

A mis estimados profesores de la carrera, por compartir su valioso conocimiento y por su dedicación en la formación de futuros profesionales. Quiero expresar mi reconocimiento especial al Dr. Faustino de Luna, cuya orientación y asesoramiento fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

A mi increíble novia, Andrea, por apoyarme en todo lo posible durante estos últimos semestres, por tu paciencia y comprensión. Agradezco tu amor y compañía, eres especial en mi vida.

A mis amigos de la carrera, como César y Lyan, y a mis amigos de toda la vida, como María Fernanda y Justo, gracias por su amistad sincera y por los momentos inolvidables que hemos compartido. Su compañía ha enriquecido mi vida de una manera indescriptible.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| Justificación | 3 |
| Metodología | 5 |
| Alcance | 6 |
| OBJETIVOS | 7 |
| Objetivos Generales | 7 |
| Objetivos Específicos | 7 |
| I. MARCO TEÓRICO | 8 |
| I.1. Sistema de abastecimiento y red de distribución de agua potable..... | 8 |
| I.2. Flujo permanente y no permanente | 12 |
| I.3. Ecuación de la energía: Presión y nivel piezométrico en las tuberías | 14 |
| I.4. Desafíos en las redes de distribución | 19 |
| I.5. Importancia de los registros de presión de las estaciones medidoras..... | 22 |
| II. DISPONIBILIDAD DE REGISTROS | 23 |
| II.1. Recopilación y procesamiento de los datos | 23 |
| II.2. Ajuste para consistencia de los datos..... | 25 |
| II.3. Importancia del ajuste de los datos | 28 |
| II.4. Modelo digital de elevación de las estaciones de presión | 29 |
| II.5. Cálculo del nivel piezométrico..... | 35 |
| II.6. Análisis descriptivo de los registros de presión y de los niveles piezométricos..... | 36 |
| II.6.A. Gráficos y tablas generales..... | 37 |
| II.6.B. Gráficos y tablas por estación | 38 |
| III. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS | 44 |
| III.1. Comparación con estándares | 44 |
| III.2. Identificación de tendencias..... | 48 |
| III.3. Relación de la línea piezométrica con el perfil de elevaciones | 51 |
| III.4. Relación de valores entre estaciones | 57 |
| III.5. Evaluación del funcionamiento del sistema de abastecimiento | 58 |
| III.6. Aspectos que considerar de los resultados de la red de distribución | 60 |

IV. COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN DURANTE EVENTOS SIGNIFICATIVOS. 61

- IV.1. Pandemia de COVID-19 62
- IV.2. Centro urbano “Mítikah” 67

V. CONCLUSIONES 69

BIBLIOGRAFÍAS 74

ANEXO A..... 78

ANEXO B..... 79

ANEXO C 93

Índice de Ilustraciones

| | |
|--|----|
| Ilustración 1. Esquema general de un sistema de abastecimiento de agua potable..... | 8 |
| Ilustración 2. Esquema general de una red de distribución de agua potable con algunos de los componentes mencionados..... | 9 |
| Ilustración 3. Ejemplo de un mes con distribución continua de agua potable en todas las zonas..... | 10 |
| Ilustración 4. Ejemplo de un mismo mes con distribución de agua potable por tandeo en distintas zonas .. | 10 |
| Ilustración 5. Presión dentro de una tubería cuando se trabaja a tubo lleno | 16 |
| Ilustración 6a y 6b. Diferencia en el suministro de agua según la altura del tanque de distribución | 17 |
| Ilustración 7. Esquema de las cargas de un flujo junto con la línea piezométrica y la línea de energía..... | 18 |
| Ilustración 8. Captura del “Plano General 97 Estaciones de Presiones Red Primaria” haciendo una ampliación en la ubicación de las estaciones de presión Amores, Repúblicas y Universidad | 29 |
| Ilustración 9. Mapa de la ubicación de las estaciones y de los tanques de distribución con su respectiva tubería | 30 |
| Ilustración 10. Mapa hipsométrico de la ubicación de las estaciones y sus tanques de distribución | 31 |
| Ilustración 11. Planta de la tubería del tanque Santa Lucía a la estación Amores | 32 |
| Ilustración 12. Planta de la tubería del tanque Dolores Norte a la estación Repúblicas..... | 33 |
| Ilustración 13. Planta de la tubería del tanque CAO a la estación Universidad | 34 |
| Ilustración 14. Mapa de la ubicación de las estaciones, así como del centro urbano “Mítikah” | 67 |
| Ilustración A-1. Plano General 97 Estaciones de Presiones Red Primaria | 78 |

Índice de Gráficos

| | |
|--|----|
| Gráfico 1. Ejemplo del comportamiento en flujo permanente y no permanente de la presión dentro de una tubería a cada hora durante una semana | 12 |
| Gráfico 2. Coeficientes de variación horaria para Ciudad de México | 20 |
| Gráfico 3. Coeficientes de variación horaria para distintas ciudades de México | 21 |
| Gráfico 4. Coeficientes de variación horaria para pequeñas comunidades | 21 |
| Gráfico 5. Promedio mensual de las presiones en la estación Amores antes y después de la depuración (Enero 2020 – Junio 2023) | 28 |
| Gráfico 6. Perfil de elevaciones de la tubería del tanque Santa Lucía a la estación Amores | 32 |
| Gráfico 7. Perfil de elevaciones de la tubería del tanque Dolores Norte a la estación Repúblicas | 33 |
| Gráfico 8. Perfil de elevaciones de la tubería del tanque CAO a la estación Universidad | 34 |
| Gráfico 9a, 9b, 9c y 9d. Promedios generales de presión por año, por mes, por día de la semana y por hora respectivamente (Enero 2020 – Junio 2023) | 37 |
| Gráfico 10a y 10b. Promedios anuales de presión y del nivel piezométrico por estación (Enero 2020 – Junio 2023) | 38 |
| Gráfico 11a y 11b. Promedios bimestrales de presión y del nivel piezométrico por estación (Enero 2020 – Junio 2023) | 39 |
| Gráfico 12a y 12b. Promedios mensuales de presión y del nivel piezométrico por estación (Enero 2020 – Junio 2023) | 40 |
| Gráfico 13a y 13b. Promedios horarios de presión y del nivel piezométrico por día de la semana y por estación (Enero 2020 – Junio 2023) | 41 |
| Gráfico 14a y 14b. Promedios horarios de presión y del nivel piezométrico por estación (Enero 2020 – Junio 2023) | 42 |
| Gráfico 15. Promedios de presión de cada mes del período de estudio de cada estación (Enero 2020 – Junio 2023) comparados con la presión mínima requerida | 45 |
| Gráfico 16. Promedios horarios de presión por estación (Enero 2020 – Julio 2023) comparados con la presión mínima requerida | 45 |
| Gráfico 17. Promedios de presión de cada mes del período de estudio de cada estación (Enero 2020 – Junio 2023) comparados con la presión máxima recomendada | 46 |
| Gráfico 18a, 18b y 18c. Comparación de los promedios del nivel piezométrico de las estaciones con la elevación de su tanque de distribución correspondiente | 47 |
| Gráfico 19. Promedio del cociente de la presión mensual entre la presión media anual correspondiente de cada estación | 49 |
| Gráfico 20. Promedio del cociente de la presión mensual entre la presión media anual correspondiente de las estaciones en conjunto | 49 |
| Gráfico 21. Líneas piezométricas del tanque Santa Lucía hasta la estación Amores | 52 |
| Gráfico 22. Líneas piezométricas del tanque Dolores Norte hasta la estación Repúblicas | 53 |
| Gráfico 23. Líneas piezométricas del tanque CAO hasta la estación Universidad | 53 |
| Gráfico 24. Promedio de presión diario de las estaciones en conjunto que abarca el antes y después del inicio de las fases epidemiológicas en México (Enero 2020 – Junio 2020) | 63 |

| | |
|---|----|
| Gráfico 25.Promedio de presión horario de las estaciones en conjunto que abarca el antes y después del inicio de las fases epidemiológicas en México (Enero 2020 – Mayo 2020) | 63 |
| Gráfico 26.Promedio diario de presión de las estaciones en conjunto durante en distintos meses de la pandemia COVID-19 | 65 |
| Gráfico 27.Promedio horario de presión de las estaciones en conjunto en distintos meses de la pandemia COVID-19 | 65 |
| Gráfico 28.Promedio diario de presión por estación un mes antes y un mes después de la inauguración del centro urbano “Mítikah” | 68 |
| Gráfico B-1.Presión a cada hora en la estación Amores de Enero 2020 a Junio 2023 | 79 |
| Gráfico B-2.Presión a cada hora en la estación Repúblicas de Enero 2020 a Junio 2023 | 80 |
| Gráfico B-3.Presión a cada hora en la estación Universidad de Enero 2020 a Junio 2023 | 81 |
| Gráfico B-4.Promedio general de presión por semestre (Enero 2020 – Junio 2023) | 82 |
| Gráfico B-5.Promedio general de presión por cuatrimestre (Enero 2020 – Junio 2023) | 82 |
| Gráfico B-6.Promedio general de presión por trimestre (Enero 2020 – Junio 2023) | 83 |
| Gráfico B-7.Promedio general de presión por bimestre (Enero 2020 – Junio 2023) | 83 |
| Gráfico B-8a y B-8b.Promedios mensuales de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Amores (Enero 2020 – Junio 2023) | 84 |
| Gráfico B-9a y B-9b.Promedios en la semana de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Amores (Enero 2020 – Junio 2023) | 85 |
| Gráfico B-10a y B-10b.Promedios horario de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Amores (Enero 2020 – Junio 2023) | 86 |
| Gráfico B-11a y B-11b.Promedios mensuales de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Repúblicas (Enero 2020 – Junio 2023) | 87 |
| Gráfico B-12a y B-12b.Promedios en la semana de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Repúblicas (Enero 2020 – Junio 2023) | 88 |
| Gráfico B-13a y B-13b.Promedios horario de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Repúblicas (Enero 2020 – Junio 2023) | 89 |
| Gráfico B-14a y B-14b.Promedios mensuales de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Universidad (Enero 2020 – Junio 2023) | 90 |
| Gráfico B-15a y B-15b.Promedios en la semana de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Universidad (Enero 2020 – Junio 2023) | 91 |
| Gráfico B-16a y B-16b.Promedios horario de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Universidad (Enero 2020 – Junio 2023) | 92 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1.Ejemplo de una misma semana con distribución de agua potable intermitente en distintas zonas . | 11 |
| Tabla 2.Descripción de las energías que posee un fluido | 14 |
| Tabla 3.Descripción de las cargas que posee un flujo en tuberías | 15 |
| Tabla 4.Descripción de las pérdidas en una línea de conducción | 16 |
| Tabla 5.Datos recopilados en las estaciones de presión seleccionadas (Diciembre 2019 – Junio 2023) ... | 23 |
| Tabla 6.Valores recopilados acomodados | 24 |
| Tabla 7.Valores recopilados acomodados con columnas derivadas de la fecha y hora | 24 |
| Tabla 8.Valores recopilados con campos de períodos más amplios | 24 |
| Tabla 9.Valores de presión frecuentes en los datos recopilados, omitiendo el valor 0 | 25 |
| Tabla 10.Cantidad de datos recopilados por hora en cada estación | 26 |
| Tabla 11.Cantidad total de datos por estación..... | 27 |
| Tabla 12.Ubicación geográfica, diámetro y tanque asociado de las estaciones seleccionadas | 30 |
| Tabla 13.Elevación de cada estación de presión, elevación del tanque de distribución correspondiente junto con la longitud de la tubería | 32 |
| Tabla 14.Cálculo del nivel piezométrico en las diferentes estaciones..... | 35 |
| Tabla 15.Promedios máximos y mínimos de presión por año, mes, día de la semana y hora de los datos en conjunto (Enero 2020 – Junio 2023)..... | 37 |
| Tabla 16.Desviación estándar de las presiones [kg/cm ²] por año, mes, día y hora de los datos en conjunto | 38 |
| Tabla 17.Promedios máximos y mínimos en cada estación del gráfico 10a y 10b | 39 |
| Tabla 18.Promedios máximos y mínimos en cada estación del gráfico 11a y 11b | 39 |
| Tabla 19.Promedios máximos y mínimos en cada estación del gráfico 12a y 12b | 40 |
| Tabla 20.Promedios máximos y mínimos en cada estación del gráfico 13a y 13b | 41 |
| Tabla 21.Promedios máximos y mínimos en cada estación del gráfico 14a y 14b | 42 |
| Tabla 22.Desviación estándar de las presiones [kg/cm ²] en cada estación por año, mes y hora | 43 |
| Tabla 23.Recomendaciones para la selección de la tubería de acuerdo con las presiones y al diámetro ... | 46 |
| Tabla 24.Valores promedios, máximos y mínimos de cada estación para generar las líneas piezométricas | 51 |
| Tabla 25.Cálculo de la velocidad en un tramo antes de cada estación. | 54 |
| Tabla 26.Cálculo de las pérdidas totales de carga en cada estación..... | 55 |
| Tabla 27.Diferencia entre los niveles piezométricos del tanque y de la estación | 55 |
| Tabla 28.Período de las fases epidemiológicas establecidas en México durante la pandemia COVID-19... | 62 |
| Tabla 29.Distance entre el centro urbano “Mítikah” y cada una de las estaciones de presión | 67 |
| Tabla C- 1.Reporte de las presiones registradas en la estación Universidad en el mes de Junio de 2023.. | 93 |
| Tabla C-2.Desviación estándar de los niveles de presión [msnm] en cada estación por año, mes y hora... | 94 |
| Tabla C-3.Desviación estándar de los promedios presión [kg/cm ²] en cada estación por semestre, cuatrimestre, trimestre y bimestre de los datos en conjunto | 95 |

| | |
|--|----|
| Tabla C-4.Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-8a y B-8b..... | 95 |
| Tabla C-5.Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-9a y B-9b..... | 95 |
| Tabla C-6.Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-10a y B-10b | 95 |
| Tabla C-7.Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-11a y B-11b | 96 |
| Tabla C-8.Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-12a y B-12b | 96 |
| Tabla C-9.Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-13a y B-13b | 96 |
| Tabla C-10.Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-14a y B-14b | 96 |
| Tabla C-11.Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-15a y B-15b | 96 |
| Tabla C-12.Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-16a y B-16b | 96 |
| Tabla C-13.Aumentos y disminuciones en los promedios mensuales de la presión [kg/cm ²] | 97 |

Glosario

Archivos ASCII: Formato de codificación de caracteres que representa texto utilizando códigos numéricos, facilitando el intercambio de información entre sistemas informáticos.

Asbesto-Cemento: Material compuesto que contiene asbesto y cemento, comúnmente utilizado en tuberías para la conducción de agua.

Cavitación: Fenómeno en el cual la disminución de la presión de un líquido provoca la formación de burbujas de vapor, seguida por su colapso repentino, generando ondas de choque que pueden dañar las superficies de las tuberías y equipos.

Consumidores de agua: Individuos, industrias o entidades que utilizan agua para sus diversas necesidades, como consumo humano, procesos industriales o riego.

Demanda de agua: Cantidad total de agua requerida por una comunidad, industria o región en un período de tiempo determinado.

Factor de fricción: Coeficiente que representa la resistencia al flujo del agua en una tubería.

Gasto: Volumen de agua que fluye a través de un punto específico en un sistema de tuberías en un período de tiempo determinado, medido en unidades como litros por segundo o metros cúbicos por hora.

Georrefenciar: Asociar datos con coordenadas geográficas, permitiendo la ubicación exacta en un mapa o sistema de coordenadas.

Gestión del agua: Proceso integral que abarca la planificación, desarrollo, distribución y control eficiente del agua para garantizar el suministro sostenible de agua a diferentes sectores, como la agricultura, la industria y el consumo humano.

Hidráulica: La hidráulica es una rama de la física que se ocupa del estudio de las propiedades y el comportamiento de los fluidos, especialmente de los líquidos, y de las fuerzas que actúan sobre ellos. Algunos de los conceptos fundamentales en hidráulica incluyen la presión, el flujo, la viscosidad, la densidad y la hidrostática. La hidráulica se utiliza para diseñar y analizar sistemas que involucran el movimiento y el control de fluidos, como canalizaciones, tuberías, bombas, válvulas y otros dispositivos.

Implosión: Colapso violento hacia el interior de una cavidad o espacio, en el contexto de sistemas de agua, esto puede ocurrir como resultado de la cavitación, donde las burbujas de vapor colapsan de manera brusca.

Lidar: Tecnología de teledetección que utiliza pulsos láser para medir distancias y generar mapas tridimensionales de la superficie terrestre.

Línea de conducción: Sistema principal de tuberías diseñado para transportar agua desde una fuente, como un cuerpo de agua o una planta de tratamiento, hasta las áreas de distribución o almacenamiento.

Línea de alimentación: Tubería que suministra agua desde la línea de conducción principal a las redes de distribución secundarias.

Presión: En un sistema de tuberías, la presión se refiere al esfuerzo ejercido por el fluido en dirección perpendicular a su movimiento al interior de las tuberías.

Red primaria: Sistema de tuberías principales que transporta agua desde la planta de tratamiento hacia las áreas de distribución.

Red secundaria: Sistema de tuberías que distribuye agua desde la red primaria a los consumidores finales.

Rotura de tubería: Daño o ruptura en una tubería que provoca la pérdida de agua y puede causar interrupciones en el suministro.

Telemetría: Sistema de medición y transmisión remota de datos que utiliza tecnologías de telecomunicaciones. Permite monitorear y recopilar información en tiempo real sobre diversas variables, como la ubicación, condiciones o comportamiento de objetos o procesos.

RESUMEN

La presente investigación aborda el tema del comportamiento de los registros de presión en un sistema de abastecimiento de agua potable. El objetivo principal es analizar y dar interpretación a los registros de presión disponibles, además de identificar cambios relevantes en el comportamiento de la presión a lo largo del tiempo, especialmente durante eventos notables ocurridos en el período de estudio, como la pandemia de COVID-19 y la construcción del centro comercial del centro urbano "Mítikah".

La revelación de posibles vínculos entre la variación en la presión y acontecimientos notables, como una crisis de salud o un evento de carácter urbano, plantea interrogantes interesantes. ¿Podría la presión del agua, de alguna manera, ser un reflejo de los acontecimientos en la superficie? ¿Podría ser un indicador silencioso de nuestra vida cotidiana y el impacto de la ingeniería civil en nuestro entorno?

En esta tesis, propuse una metodología para compilar un gran número de registros horarios. En cuanto a los cálculos, abordé el nivel piezométrico, la velocidad del flujo en la tubería, la carga total y las pérdidas de carga. También, incluí gráficos que muestran los promedios de presión y nivel piezométrico por hora, día, semana, mes y año, tanto para las estaciones en conjunto como de manera individual. Asimismo, presento gráficos que ilustran el perfil de elevaciones de la tubería y de la línea piezométrica.

Para ello, seguí distintas etapas metodológicas. En primer lugar, realicé una recopilación y un procesamiento de 94,176 datos de presión horaria de tres estaciones disponibles de una red de distribución de agua potable, que abarcan desde diciembre de 2019 hasta junio de 2023. Seguido de una corrección en el conjunto de datos, donde logré una uniformidad que implicó la eliminación de valores irregulares, los cuales distorsionaban las medidas de tendencia central.

Posteriormente, empleé un Sistema de Información Geográfica (SIG) para generar un Modelo Digital de Elevación (MDE) que incluye las estaciones de presión con el propósito de tener una visualización espacial y calcular el nivel piezométrico en función de la elevación y la carga de presión.

La siguiente etapa fue realizar un análisis descriptivo de los registros de presión y niveles piezométricos, con el cual obtuve una visión general del comportamiento de estos datos durante el período de estudio, relacionando los resultados con información previa e identificando patrones y tendencias relevantes, todo esto a través de gráficos y tablas dinámicas de Excel. Estos últimos puntos me permitieron realizar una evaluación del funcionamiento del sistema analizado. Además, con los gráficos dinámicos pude delimitar el periodo de análisis a conveniencia, lo que facilitó el estudio de los dos eventos mencionados basándome en fechas significativas para cada uno.

Los resultados de esta investigación tienen un potencial significativo en el campo de la ingeniería civil. Podrían revolucionar la eficiencia y la gestión de sistemas de distribución de agua, proporcionando información esencial para contribuir a mejorar la operación y la toma de decisiones. Esto, en última instancia, se traduciría en un beneficio para la calidad de vida en nuestra comunidad.

INTRODUCCIÓN

Justificación

En México, la gestión del agua enfrenta desafíos que se han ido desarrollando y agravando a lo largo de los años, ya que el agua potable ha evolucionado de ser un recurso abundante a uno cada vez más escaso. Los problemas de gestión del agua en México incluyen la sobreexplotación de acuíferos, la contaminación del agua, la falta de infraestructura adecuada y la ineficiencia en la distribución del agua a los distintos consumidores, lo que ha llevado a la escasez de agua en diversas regiones del país.

En el contexto del uso del agua, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) clasifica a los consumidores en tres sectores principales: agrícola, abastecimiento público e industrial. Centrándonos en el sector de abastecimiento público, este se refiere a la distribución de agua a través de sistemas de agua potable que suministran tanto a los hogares como a las instalaciones públicas dentro de áreas urbanas.

La ineficiencia en este sector se origina principalmente en la red de distribución de agua. Factores como la antigüedad de las tuberías, su exposición a condiciones ambientales adversas y el desgaste provocado por el tráfico vehicular son factores que contribuyen a significativas fugas, resultando en el desperdicio de agua y pérdidas económicas. Además, la presencia de tomas clandestinas que sustraen agua ilegalmente daña aún más las tuberías y compromete la calidad del agua. Un inconveniente más son las variaciones en la demanda, que pueden sobrecargar o subutilizar la red, ocasionando problemas tanto en la presión como en la calidad del agua.

Es por esta razón que organismos toman un papel fundamental en la gestión del agua, como el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), la Comisión del Agua del Estado de Veracruz (CAEV), la Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEAJ), entre otros. Estos organismos, entre otras funciones, trabajan en la reducción de la ineficiencia de las redes de distribución y utilizan estaciones medidoras que registran valores horarios de diversos parámetros, como la presión y el caudal. Dichos valores se compilan en un reporte mensual que abarca los datos de cada hora del mes correspondiente. Es esencial aclarar que con la disponibilidad de estos reportes se puede desarrollar el proyecto de investigación.

La necesidad de llevar a cabo esta tesis radica en abordar un desafío de gran relevancia en el ámbito de la ingeniería civil y la gestión de recursos hídricos. En vista de la situación actual del agua en México, comprender el comportamiento de la presión en la red de distribución de agua podría ser de gran utilidad.

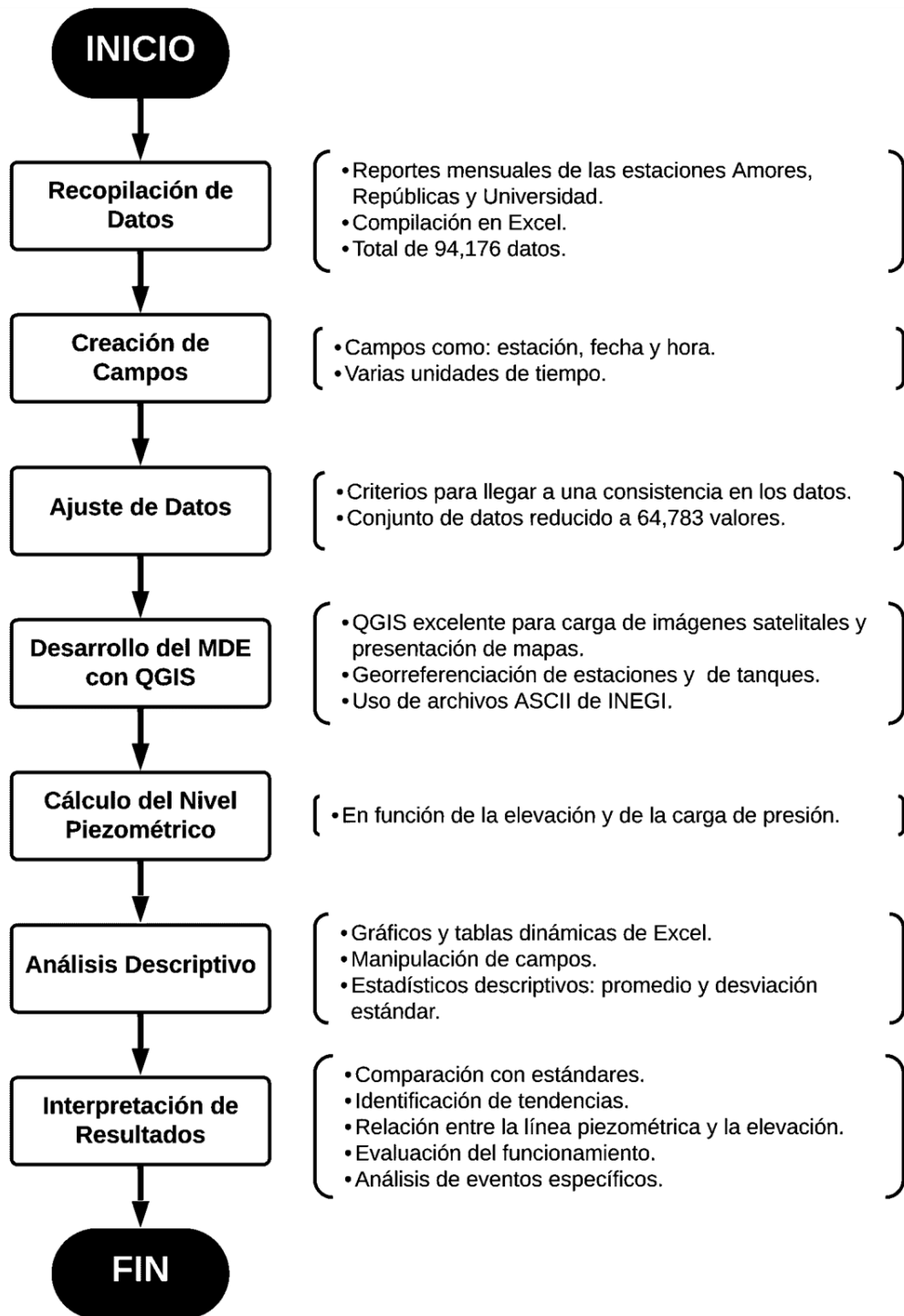
El presente trabajo analiza lo que puede ser un suministro de agua seguro y eficiente. El acceso a agua de calidad desempeña un papel fundamental en la vida cotidiana de la población, y la disponibilidad de agua con la presión adecuada es esencial para cubrir las necesidades básicas de los hogares y garantizar el funcionamiento en áreas urbanas. Por tal motivo, la ingeniería civil especializada en esta área debe proveer un servicio de agua potable con la presión adecuada las 24 horas del día, lo que permite que nuestras actividades diarias se desarrollen sin dificultades.

Además, la investigación proporciona elementos para la toma de decisiones en virtud de la necesidad de mantener y mejorar la infraestructura de distribución de agua con el fin de garantizar su eficiencia y prolongar su vida útil.

Un aspecto clave se relaciona con la capacidad de detectar cambios en la distribución de agua originados por eventos significativos. Situaciones como crisis de salud pública o proyectos de construcción de gran envergadura pueden influir en la distribución de agua. El análisis descriptivo usado en la tesis se enfoca en los de presión para identificar dichos cambios y tomar medidas apropiadas en situaciones de emergencia. Esto es fundamental para garantizar que el suministro de agua a la población no se vea comprometido en circunstancias de tales magnitudes.

Metodología

En el presente trabajo empleé la siguiente metodología para recopilar, procesar y analizar los datos de presión de las estaciones disponibles de una red de distribución de agua potable:



Alcance

El enfoque temático de este trabajo se concentra en la hidráulica de tuberías, destacando el análisis del comportamiento de la presión en el sistema de abastecimiento de agua potable. Durante este análisis, identifiqué y examiné tendencias temporales, variaciones y patrones en los datos de presión. Simultáneamente, me ocupé del nivel piezométrico, derivado de la carga de presión, estableciendo conexiones con las pérdidas de carga en la tubería mediante el perfil de elevaciones. Todo esto permitió realizar una evaluación integral del funcionamiento del sistema. No obstante, es relevante señalar que la investigación no abordó aspectos relacionados con otros parámetros del sistema de distribución de agua potable, como la calidad del agua, ni consideró factores operativos más allá del alcance de las mediciones de presión.

Para el desarrollo de la tesis, fue crucial crear un MDE mediante el uso de un SIG. Este proceso demandaba una combinación de habilidades y conocimientos para manejar el SIG seleccionado. Abarca destrezas técnicas, como la familiaridad con el software SIG y la comprensión de bases de datos geoespaciales. Asimismo, requiere conocimientos geográficos que engloba principios cartográficos, sistemas de coordenadas y topología espacial. En cuanto a la gestión de datos, resulta esencial dominar la adquisición, digitalización, carga y modificación de datos y archivos en el SIG, especialmente aquellos en formato ASCII proporcionados por el INEGI. La capacidad para comunicar de manera efectiva a través de mapas detallados también constituye un aspecto crucial. El dominio de los SIG es relevante en la formación de ingenieros civiles, ya que permite gestionar eficientemente información geoespacial en proyectos de ingeniería y planificación urbana.

Utilicé Excel para compilar y procesar los registros de presión, llevando a cabo los cálculos necesarios y generando tablas con información relevante. En esta aplicación, hice uso de gráficos y tablas dinámicas, herramienta valiosa para gestionar conjuntos de datos extensos de manera eficiente. Esta función me permitió organizar los datos según campos específicos y crear gráficos personalizados de manera ágil, adaptándome a las necesidades específicas de la investigación.

OBJETIVOS

Objetivos Generales

- Analizar e interpretar el comportamiento de las presiones en las estaciones de presión de una red primaria de distribución de agua potable, utilizando los registros disponibles desde diciembre 2019 hasta junio 2023.
- Comparar el comportamiento de las presiones en eventos significativos ocurridos en el período de estudio, como la pandemia de COVID-19 y la apertura de un centro comercial, tres torres de departamentos, oficinas y consultorios del centro urbano “Mítikah”, para identificar posibles cambios relevantes.

Objetivos Específicos

- Organizar los valores de presión de los reportes mensuales de las estaciones de presión seleccionadas en un archivo de Excel.
- Realizar un ajuste de los datos, siguiendo criterios establecidos para que el análisis y la interpretación de los resultados no se vean afectados.
- Generar un MDE de la zona de estudio que incluya las estaciones, los tanques de distribución y la tubería que los conecta.
- Calcular el nivel piezométrico para cada registro a partir de la elevación de las estaciones de presión y la presión registrada.
- Realizar un análisis descriptivo de las presiones y niveles piezométricos, generando gráficos y tablas dinámicas en Excel los promedios de presión y nivel piezométrico.
- Interpretar los promedios de presión y del nivel piezométrico mediante la comparación de estándares, la identificación de tendencias, la relación de la línea piezométrica con el perfil de elevaciones y la relación con eventos específicos.
- Evaluar el funcionamiento del sistema de distribución de agua potable.
- Identificar fechas relevantes de los eventos a analizar y decidir si los datos de la presión se trabajarán de manera conjunta o por estación.

I. MARCO TEÓRICO

I.1. Sistema de abastecimiento y red de distribución de agua potable

El abastecimiento de agua potable comprende una serie de procesos técnicos mediante los cuales el agua se conduce hasta los puntos de consumo para ser empleada por el ser humano. Dentro de estos procesos, la distribución juega un papel fundamental y se lleva a cabo mediante una red de distribución de agua potable. Esta red, compuesta por tuberías, accesorios y estructuras, es responsable de conducir el agua desde los tanques de almacenamiento o regulación hasta las propiedades de los usuarios o hidrantes públicos.

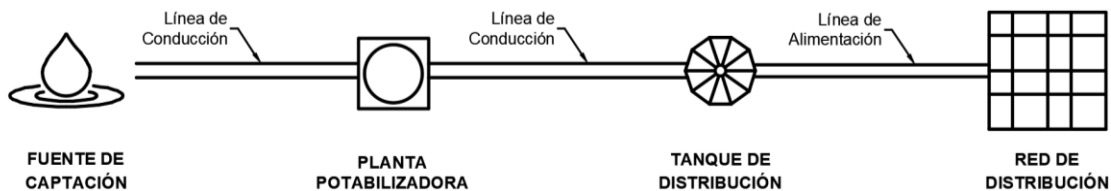


Ilustración 1. Esquema general de un sistema de abastecimiento de agua potable

La importancia de la red de distribución de agua potable radica en su capacidad para proporcionar agua de manera eficiente y segura a los usuarios para consumo doméstico, público, comercial, industrial y en situaciones extraordinarias como la extinción de incendios. Es crucial que esta red esté diseñada adecuadamente y reciba un buen mantenimiento para garantizar una presión óptima, una calidad del agua adecuada y un servicio continuo en todos los puntos de la red. Además, se deben considerar aspectos como la capacidad de flujo, la ubicación estratégica de los tanques de almacenamiento, la prevención de fugas y la implementación de sistemas de monitoreo y control para asegurar un suministro confiable y de calidad.

Una red de distribución de agua potable está conformada por diversos elementos que trabajan en conjunto para garantizar el suministro eficiente y seguro del agua a los usuarios. Entre estos componentes se encuentran las tuberías, conductos de sección circular que se unen en puntos llamados nudos o uniones y suministran agua a zonas específicas. Las tuberías, a su vez forman parte de la línea de conducción y de alimentación, que conducen el agua desde la fuente de captación hasta el tanque de regulación y del tanque a las redes primarias y secundarias respectivamente.

Además, existen piezas especiales que cumplen funciones específicas, como realizar ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetro y terminales de los conductos. Las válvulas son accesorios fundamentales, ya que regulan el flujo de agua en las tuberías y se dividen en dos categorías: aislamiento o

seccionamiento, que permiten separar o cortar el flujo en tramos específicos para revisiones o reparaciones, y válvulas de control, utilizadas para regular el gasto y la presión del agua, facilitando también la entrada o salida de aire o sedimentos.

Asimismo, los hidrantes son tomas o conexiones especiales que se instalan en puntos estratégicos de la red para abastecer de agua a varias familias o para proveer agua en casos de incendio. Los tanques de distribución son depósitos que almacenan agua proveniente de la fuente y regulan su distribución. Pueden ser tanques de regulación, que almacenan agua adicional para momentos de alta demanda, o tanques de almacenamiento para situaciones de emergencia.

Las tomas domiciliarias son conexiones que permiten el abastecimiento de agua desde la red de distribución hasta los predios de los usuarios, incluyendo la instalación de medidores para controlar el consumo. Los rebombes, por su parte, son instalaciones de bombeo ubicadas en puntos intermedios de la línea de conducción o en la red de distribución, encargados de elevar la carga hidráulica y mantener la circulación del agua para garantizar un flujo adecuado.

Por último, las cajas rompedoras de presión son depósitos que permiten la descarga del flujo de agua de la tubería, eliminando la presión hidrostática y estableciendo un nuevo nivel estático aguas abajo, lo que contribuye a controlar la presión en la red y prevenir daños en la infraestructura.

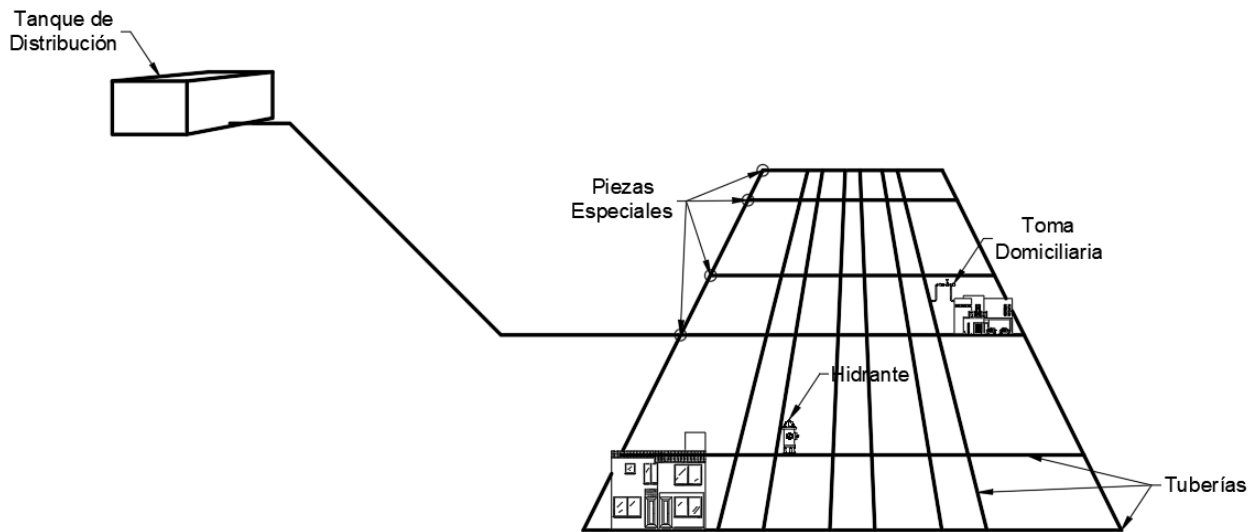


Ilustración 2. Esquema general de una red de distribución de agua potable con algunos de los componentes mencionados

En una red de distribución de agua potable, existen diferentes tipos de distribución que determinan cómo se suministra el agua a los usuarios. Estos tipos de distribución se clasifican principalmente en tres categorías en función del servicio que proporcionan.

La distribución continua implica un suministro constante de agua a los usuarios durante todo el día y todos los días de la semana. En este tipo de distribución, el agua fluye de manera ininterrumpida a través de las tuberías hacia los puntos de consumo. Es común en áreas urbanas bien establecidas y con una infraestructura sólida de distribución de agua.

| TODAS LAS ZONAS | | | | | | |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|
| D | L | M | M | J | V | S |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| 28 | 29 | 30 | 31 | | | |

DÍA CON SERVICIO
Distribución todos los días a todas horas

Ilustración 3. Ejemplo de un mes con distribución continua de agua potable en todas las zonas

La distribución por tandeo implica un suministro de agua intermitente, donde se establecen horarios o períodos específicos para la entrega del servicio a diferentes sectores o áreas de la red. Durante ciertos intervalos de tiempo, el agua se proporciona en una determinada zona, y luego se suspende para dar lugar a otra área. Este método puede ser utilizado en regiones con recursos hídricos limitados o durante épocas de sequía, donde se requiere un racionamiento planificado para asegurar un uso equitativo y sostenible del agua. Aunque puede haber días sin agua, el tandeo permite a los usuarios prepararse para su llegada y adaptar sus actividades en función de un horario establecido.

| ZONA 1 | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|
| D | L | M | M | J | V | S |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| 28 | 29 | 30 | 31 | | | |

| ZONA 2 | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|
| D | L | M | M | J | V | S |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| 28 | 29 | 30 | 31 | | | |

| ZONA 3 | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|
| D | L | M | M | J | V | S |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| 28 | 29 | 30 | 31 | | | |

DÍA CON SERVICIO
DÍA SIN SERVICIO

Ilustración 4. Ejemplo de un mismo mes con distribución de agua potable por tandeo en distintas zonas

La distribución intermitente es similar a la distribución por tandeo, pero en este caso, el suministro de agua puede ser aún más irregular y no sigue un patrón u horario preestablecido. Se caracteriza por tener períodos de interrupción más prolongados y menos predecibles en el suministro de agua. Este tipo de distribución suele ser más común en áreas rurales o en regiones con limitaciones en la infraestructura de distribución de agua. La distribución intermitente puede presentar desafíos para los usuarios, ya que deben estar preparados para almacenar agua durante los períodos de suministro y adaptarse a la falta de agua durante tiempo indefinido y prolongado.

Tabla 1. Ejemplo de una misma semana con distribución de agua potable intermitente en distintas zonas

| | DÍA DE LA SEMANA | | | | | | |
|---------------|------------------------------|---|---------------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|---|
| | <i>Domingo</i> | <i>Lunes</i> | <i>Martes</i> | <i>Miércoles</i> | <i>Jueves</i> | <i>Viernes</i> | <i>Sábado</i> |
| ZONA 1 | Con Servicio: Todo el Día | Con Servicio: Todo el Día | Sin Servicio | Sin Servicio | Sin Servicio | Sin Servicio | Sin Servicio |
| ZONA 2 | Sin Servicio | Con Servicio: De 06 a 10 hrs | Con Servicio: De 14 a 22 hrs | Sin Servicio | Con Servicio: De 08 a 12 hrs | Con Servicio: De 16 a 22 hrs | Sin Servicio |
| ZONA 3 | Sin Servicio | Con Servicio: De 07 a 09 hrs De 14 a 16 hrs | Sin Servicio | Con Servicio: De 10 a 12 hrs De 19 a 21 hrs | Sin Servicio | Con Servicio: De 15 a 17 hrs | Con Servicio: De 08 a 10 hrs De 18 a 20 hrs |

I.2. Flujo permanente y no permanente

El estudio del flujo en sistemas de tuberías es de vital importancia al abordar una red de distribución de agua potable, pues representa el método más común para transportar el agua desde su origen hasta los puntos de consumo. Estas redes suelen estar compuestas mayormente por tuberías de sección circular, ya que ofrecen una mayor resistencia estructural y una mayor sección transversal en comparación con otras formas.

A lo largo de la historia, el diseño de las redes de distribución ha priorizado el flujo uniforme y permanente, con el objetivo de mantener constantes las características del flujo, como la presión y velocidad, tanto en el espacio como en el tiempo. Se asume que la velocidad en un punto permanece constante a lo largo del tiempo y que las condiciones del flujo no cambian en ese punto.

Para el diseño de una red de distribución de agua con flujo permanente, se busca establecer parámetros de operación que aseguren un flujo uniforme y constante, para lo cual se utilizan modelos hidráulicos que permiten determinar el diámetro adecuado de las tuberías, la ubicación estratégica de los tanques de almacenamiento y las válvulas de control, garantizando así un flujo continuo y confiable.

Sin embargo, en la operación real de las redes de tuberías, se observa que los gastos de demanda varían a lo largo del día, lo que genera cambios en las presiones y en los caudales en las tuberías. Este comportamiento transitorio del flujo, conocido como flujo no permanente, implica que las condiciones en un punto pueden cambiar con el tiempo.

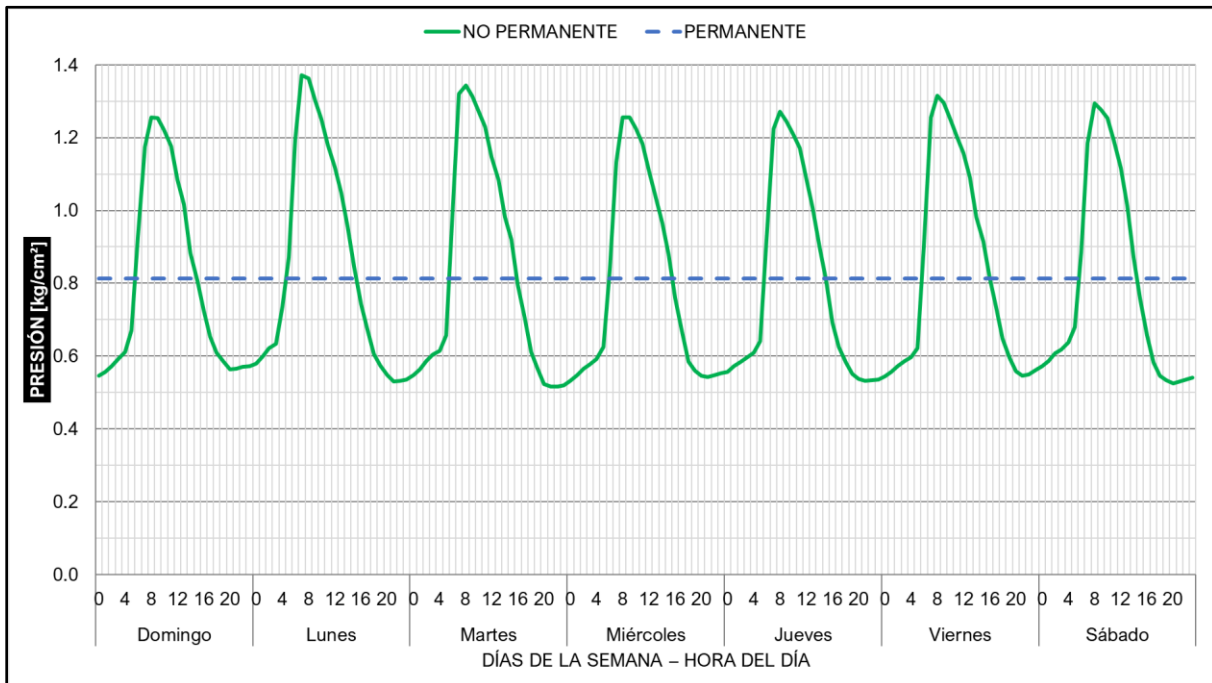


Gráfico 1. Ejemplo del comportamiento en flujo permanente y no permanente de la presión dentro de una tubería a cada hora durante una semana

Por ende, el diseño de una red de distribución de agua con flujo no permanente implica considerar las variaciones en las condiciones del flujo a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta las fluctuaciones en la demanda de agua y cómo estas afectan los niveles piezométricos y los caudales en las tuberías. Para garantizar una respuesta eficiente frente a estas variaciones en la demanda, es necesario utilizar modelos hidráulicos que consideren los cambios en el flujo y sus comportamientos transitorios, asegurando así una presión adecuada en todas las partes de la red.

I.3. Ecuación de la energía: Presión y nivel piezométrico en las tuberías

En el caso del flujo de un líquido, se establece que deben satisfacerse únicamente tres principios básicos de la Física:

- a) Conservación de la masa (principio de continuidad)
- b) Conservación de la energía (primera ley de la termodinámica)
- c) Segunda Ley de Newton del movimiento (principio de la cantidad de movimiento)

Para abordar esta cuestión, se emplean la ecuación de continuidad y la ecuación de la energía. La capacidad de un flujo para transportar materia a lo largo de una conducción y el mecanismo que modifica sus características dinámicas y de energía de un punto a otro y en el tiempo se considera esencial en este contexto.

Para el análisis presentado en este trabajo, se recurre a la ecuación de continuidad y a la ecuación de la energía. La ecuación de continuidad se deriva del principio de conservación de la masa, asegurando que la cantidad de agua que entra en una sección de la tubería sea igual a la cantidad que sale, sin acumulación ni pérdida de agua. En una red de distribución, la cantidad de agua suministrada desde el tanque debe ser equivalente a la suma de la recibida en todos los puntos de consumo.

Por otro lado, la ecuación de la energía aborda las transformaciones energéticas en el movimiento del agua, proporcionando una comprensión más profunda de estos procesos.

Tabla 2. Descripción de las energías que posee un fluido

| ENERGÍA | DESCRIPCIÓN | ECUACIÓN |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| <i>Potencial</i> | Debida a la altura del fluido | $E_z = \rho g V z$ |
| <i>Cinética</i> | Asociada con la velocidad del fluido | $E_c = \frac{mv^2}{2}$ |
| <i>De Presión</i> | Presión ejercida por el fluido | $E_p = \frac{pm}{\rho}$ |
| <i>Total</i> | Suma de estas tres energías | $E = E_z + E_c + E_p$ |

En el campo de la hidráulica, la energía se representa en términos de energía por unidad de peso, expresada en metros. En esta perspectiva, los factores que componen la

ecuación de la energía pueden interpretarse como carga de posición, debida a la energía potencial; carga de velocidad, debida a la energía cinética; carga de presión, debida a la energía de presión y carga total, que constituye la suma de estas tres cargas.

Tabla 3. Descripción de las cargas que posee un flujo en tuberías

| CARGA | DESCRIPCIÓN | FÓRMULA |
|------------------|--|---|
| <i>Posición</i> | Altura de un punto en el flujo | z |
| <i>Velocidad</i> | Altura a la que se elevaría el fluido por su velocidad | $\frac{v^2}{2g}$ |
| <i>Presión</i> | Altura del fluido que ejercería la misma presión en la sección transversal | $\frac{p}{\gamma}$ |
| <i>Total</i> | Suma de estas tres cargas | $H = z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma}$ |

Los tres términos se pueden conceptualizar como la energía "útil" para el movimiento. Cuando en un fluido real, parte de esta energía se utiliza para superar las fuerzas de fricción y atravesar los cambios locales de sección, se produce una disminución en la energía útil, denominada pérdida de carga (h_r). Comprender y calcular estas pérdidas resulta esencial en el diseño de sistemas de tuberías para asegurar el cumplimiento de los requisitos de presión y flujo.

Tabla 4. Descripción de las pérdidas en una línea de conducción

| PÉRDIDAS | DESCRIPCIÓN | FÓRMULA |
|--------------|--|---|
| Por Fricción | Se originan por la resistencia que el fluido encuentra al moverse a lo largo de las paredes internas de la tubería | <p>Darcy-Weisbach:</p> $h_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$ <p>Manning:</p> $h_f = KLQ^2$ |
| Locales | Varían según el tipo y la cantidad de accesorios presentes, como codos, válvulas, tes, expansiones y contracciones en la tubería | $h_L = k \frac{V^2}{2g}$ |
| Totales | Suma de estas dos pérdidas | $h_r = h_f + h_L$ |

En la mayoría de los casos, las pérdidas locales en las tuberías suelen tener un impacto menor en comparación con las pérdidas por fricción, por lo que a menudo se pueden pasar por alto al calcular la pérdida total. Sin embargo, en situaciones donde la tubería experimenta numerosos cambios en dirección o diámetro debido a condiciones especiales de topografía o limitaciones de espacio, es necesario considerar estas pérdidas locales.

La presión mencionada en la ecuación de la energía representa el esfuerzo ejercido por el agua en dirección perpendicular al movimiento del flujo, es decir, sobre las paredes internas de las tuberías (ilustración 5), este esfuerzo se suele medir en kilogramo fuerza por centímetro cuadrado (kgf/cm²) o en metros columna de agua (m.c.a.). Por convención práctica y porque los datos de presión originales venían con esta unidad, se utilizó kg/cm² en lugar de kgf/cm². Cuando el agua entra en una tubería, se genera una presión que se transmite a lo largo de todo el conducto, permitiendo que el agua se desplace a través de ella.

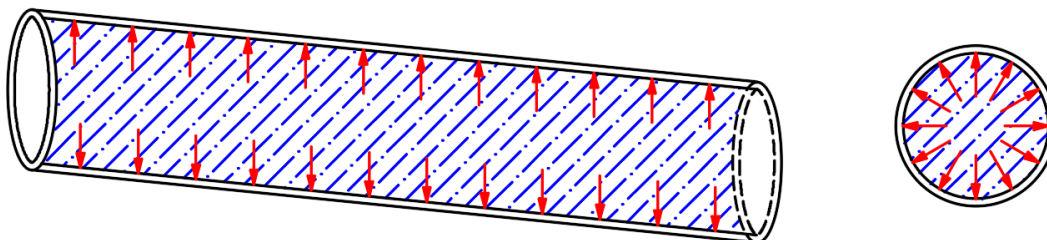


Ilustración 5. Presión dentro de una tubería cuando se trabaja a tubo lleno

En una red de distribución de agua diseñada para operar por gravedad, la presión se origina principalmente debido a la diferencia de altura entre los puntos de suministro y los puntos de consumo. Esta diferencia de altura genera una presión que dirige el flujo del agua desde tuberías más elevadas, como los tanques de almacenamiento, hacia tuberías ubicadas a menor altura, como nuestras llaves de agua. Cuanto mayor sea la elevación del tanque de agua, mayor será la presión en las tuberías (ilustración 6a y 6b). Esta presión adicional facilita que el agua llegue de manera efectiva a todos los puntos de consumo en la red de distribución, sin la necesidad de utilizar bombas adicionales para impulsar el flujo.

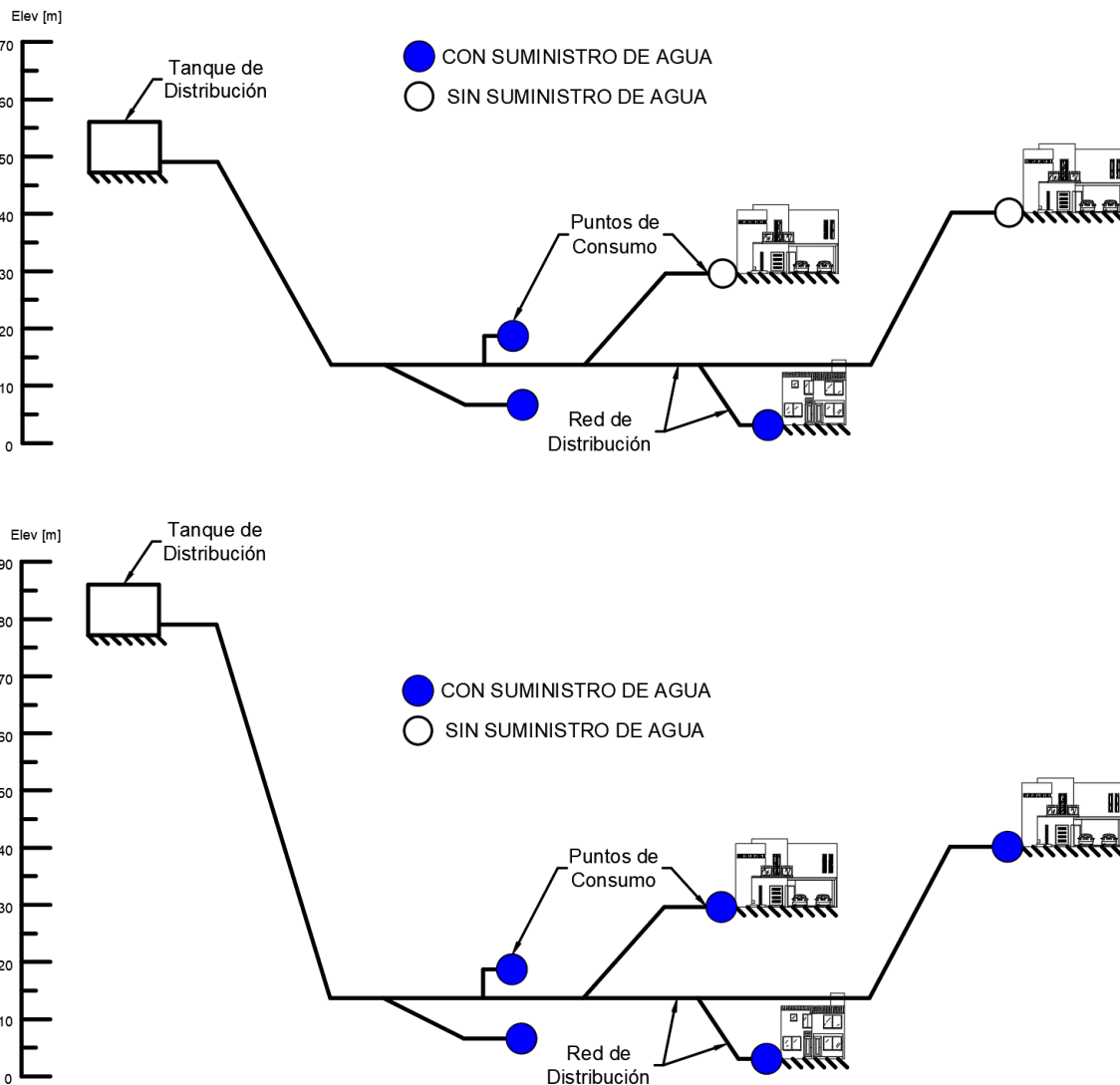


Ilustración 6a y 6b. Diferencia en el suministro de agua según la altura del tanque de distribución

Es fundamental mantener la presión del agua dentro de límites adecuados para asegurar un suministro apropiado en toda la red. Una presión excesiva puede generar daños en las tuberías, fugas, desperdicio de agua y aumentar el riesgo de roturas. Por otro lado, una

presión insuficiente puede ocasionar un flujo lento o intermitente en hogares y negocios, afectando negativamente las actividades diarias y la satisfacción del usuario.

Además, el nivel piezométrico, un término esencial relacionado con la presión en las redes de distribución de agua, abarca tanto la energía potencial como la energía de presión del fluido en ubicaciones específicas de la red. Este término se compone de dos tipos de cargas: la carga de posición y la carga de presión, en otras palabras, indica la altura a la que el agua ejercería la misma presión que en la sección transversal correspondiente, considerando también la elevación actual del agua en ese punto.

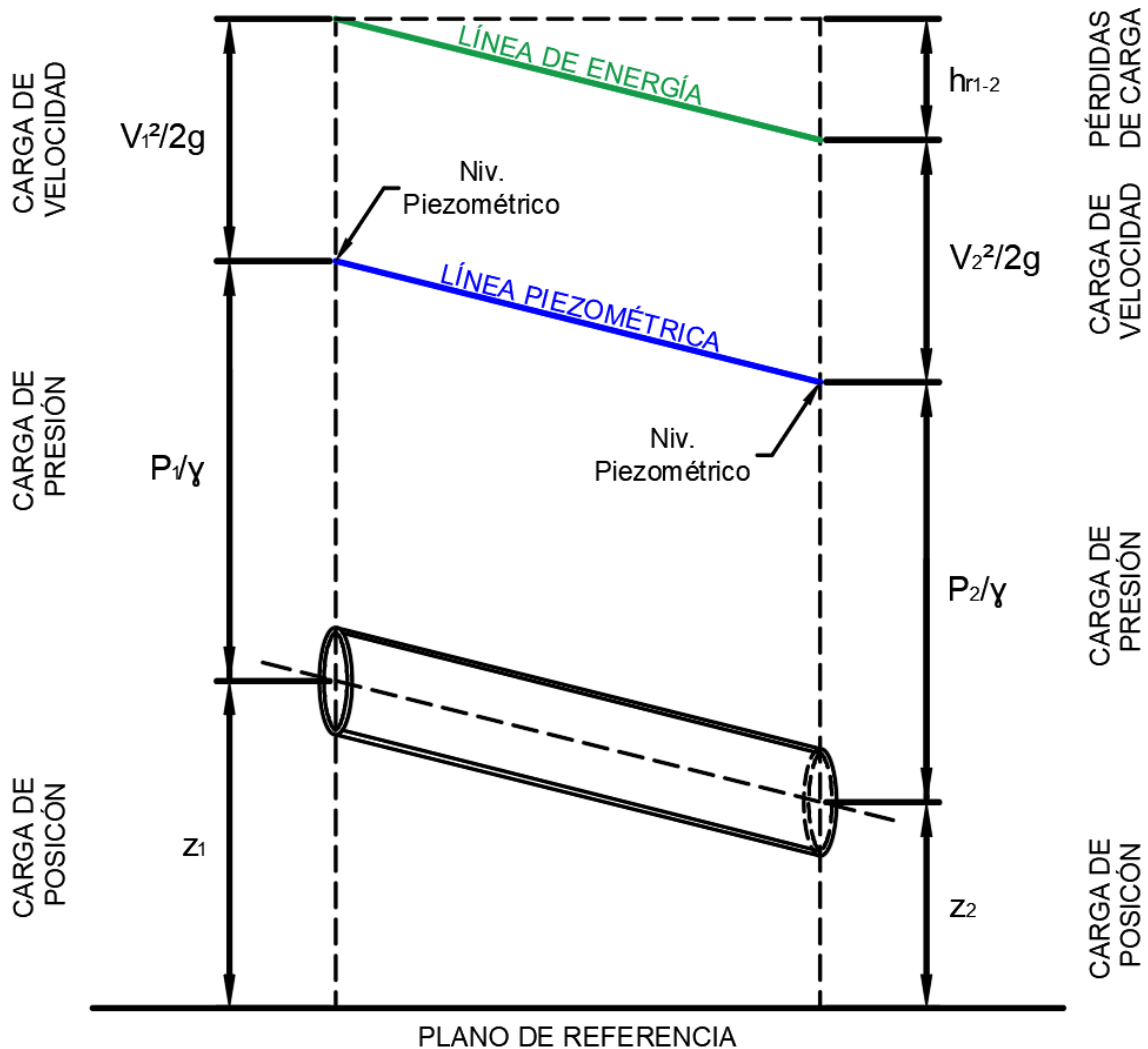


Ilustración 7. Esquema de las cargas de un flujo junto con la línea piezométrica y la línea de energía

I.4. Desafíos en las redes de distribución

Debido al continuo crecimiento de las ciudades, a un diseño deficiente de la red que no tomó en cuenta diversos factores a largo plazo y a la falta de mantenimiento adecuado, se presentan varios desafíos significativos, como en cualquier ámbito de la ingeniería, en la red de distribución de agua potable. Estos desafíos afectan directamente al consumo de agua. La atención adecuada a estos retos es esencial para mantener y mejorar la infraestructura de distribución de agua y garantizar que cumpla con las demandas cambiantes de las crecientes poblaciones.

Uno de los principales desafíos es el deterioro de las tuberías que conforman la red. El deterioro principalmente es ocasionado por la antigüedad de la infraestructura, ya que generalmente fueron construidas hace muchos años cuando la ciudad correspondiente se estaba formando. Además, la exposición constante a factores ambientales (condiciones naturales), el impacto del tráfico vehicular y otros impactos físicos aportan a este problema. Dando lugar a la aparición de fugas.

Las fugas de agua potable en las redes de distribución provocan un desperdicio considerable de agua, lo que tiene un impacto negativo en el suministro y en el abastecimiento de agua potable a la población. También reducen la eficiencia de la red ya que genera una disminución en la presión del agua y en el caudal que llega a los puntos de consumo, lo que genera pérdidas económicas a los organismos operadores del sistema de distribución de este recurso.

Detectar fugas en una red de tuberías puede ser una tarea complicada debido a que la mayoría de ellas no se pueden presenciar a simple vista. Para realizar la detección se pueden utilizar dos tipos de métodos: directo e indirecto. El método directo que consiste en usar equipos de detección acústica de sonido, como un correlador de ruido (dispositivo que calcula las velocidades del sonido) junto con un geófono (audífono que amplifica sonidos). Mientras que el método indirecto implica el análisis de consumos y presiones en la red.

Otro de los retos que se presentan en las redes de distribución son las tomas clandestinas. Estas se tratan de conexiones ilegales que las personas realizan directamente a la red de agua potable sin ningún tipo de permiso o conocimiento de las autoridades. Es una forma de robo de agua que disminuye el caudal de agua por lo que el suministro a algunas áreas de la red se verá afectado. A su vez provoca daños en las tuberías y dispositivos de control, aumento de riesgo de fugas, desperdicio de agua y afectaciones a la calidad de agua.

Se debe destacar un obstáculo adicional relacionado con las variaciones en la demanda de agua que la red de distribución a veces no puede gestionar de manera efectiva. Las variaciones de la demanda son cambios en el consumo de agua durante diferentes períodos de tiempo como horarios, días, estaciones y años. Durante períodos de alta demanda, la red de distribución se puede sobrecargar, lo que implica que se reduzca la

presión del agua en algunos puntos para satisfacer la máxima demanda de todos los usuarios. Por otro lado, en períodos de menor demanda, la red puede estar sobredimensionada, por lo tanto, habría un uso ineficiente y problemas en la calidad de agua, ya que llevaría a que el agua permanezca estancada. Es por ello por lo que el organismo encargado del sistema necesita utilizar dispositivos de regulación de presión para ajustar el flujo en función de la demanda y la hora del día.

Para comprender mejor este concepto de variación y cómo afecta a la red de distribución, es importante considerar el coeficiente de variación (CV). El CV cuantifica la fluctuación de la demanda de agua y proporciona información sobre la dispersión de esta tanto en forma diaria (CV_d) como en forma horaria (CV_h). La fuente de los gráficos 2, 3 y 4 de los coeficientes de variación es el *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable* editado por la CONAGUA (2007). En estas gráficas se puede observar la relación que guarda el gasto instantáneo (q) con respecto al gasto promedio (q_{med}) en el día, esta relación establece la demanda horaria.

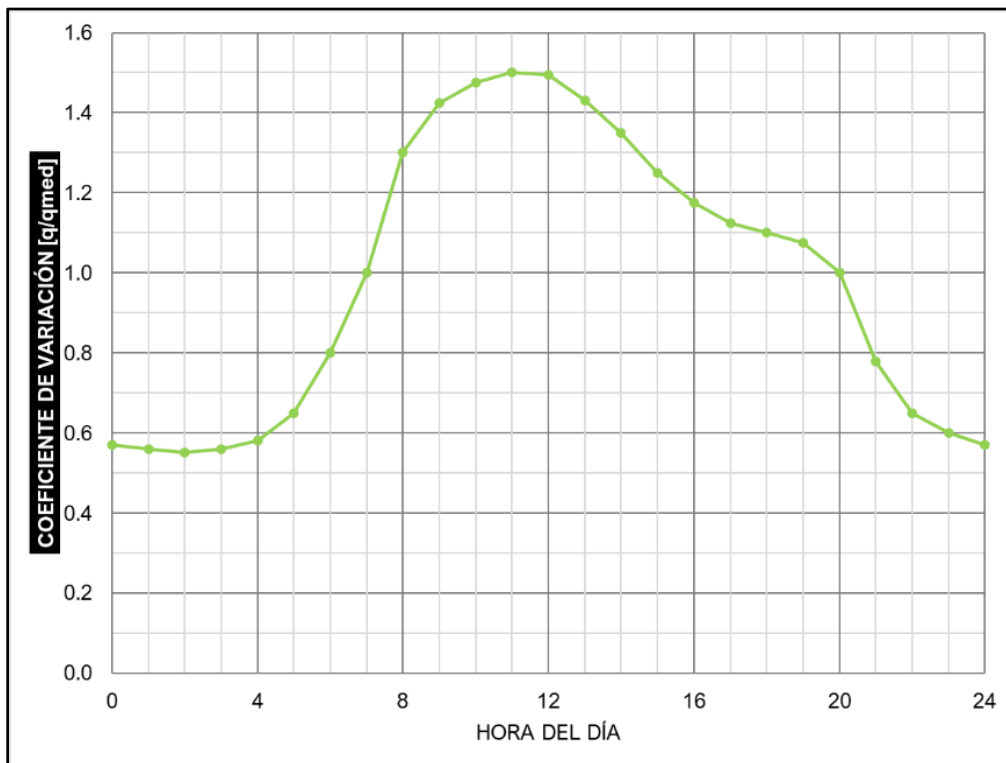


Gráfico 2. Coeficientes de variación horaria para Ciudad de México

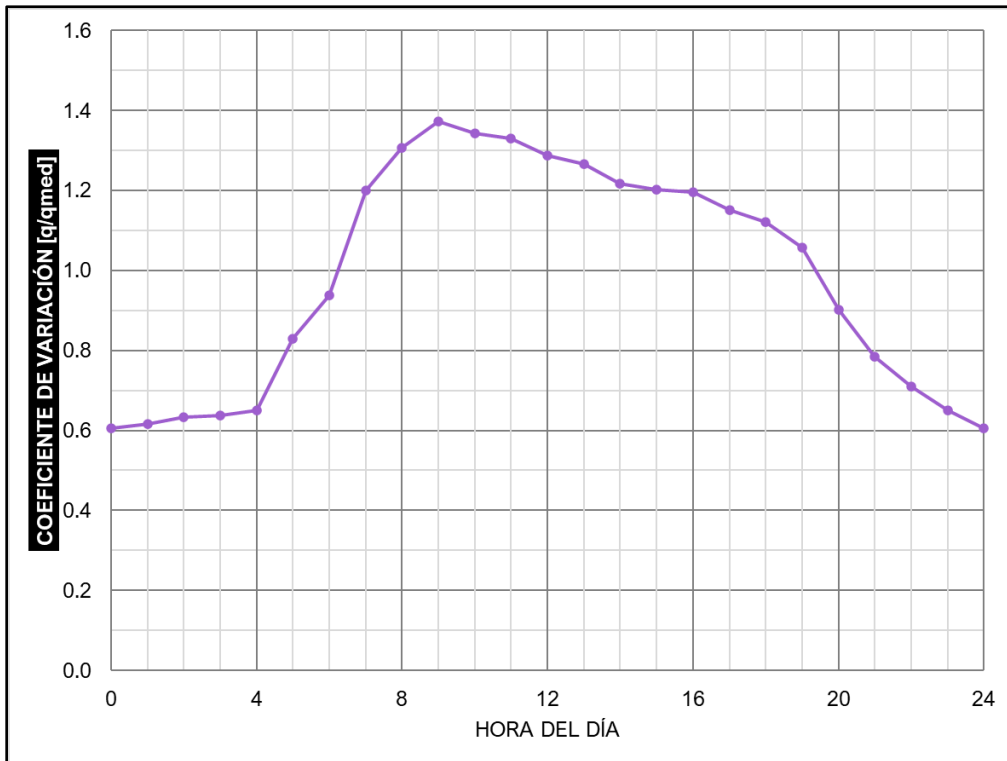


Gráfico 3. Coeficientes de variación horaria para distintas ciudades de México

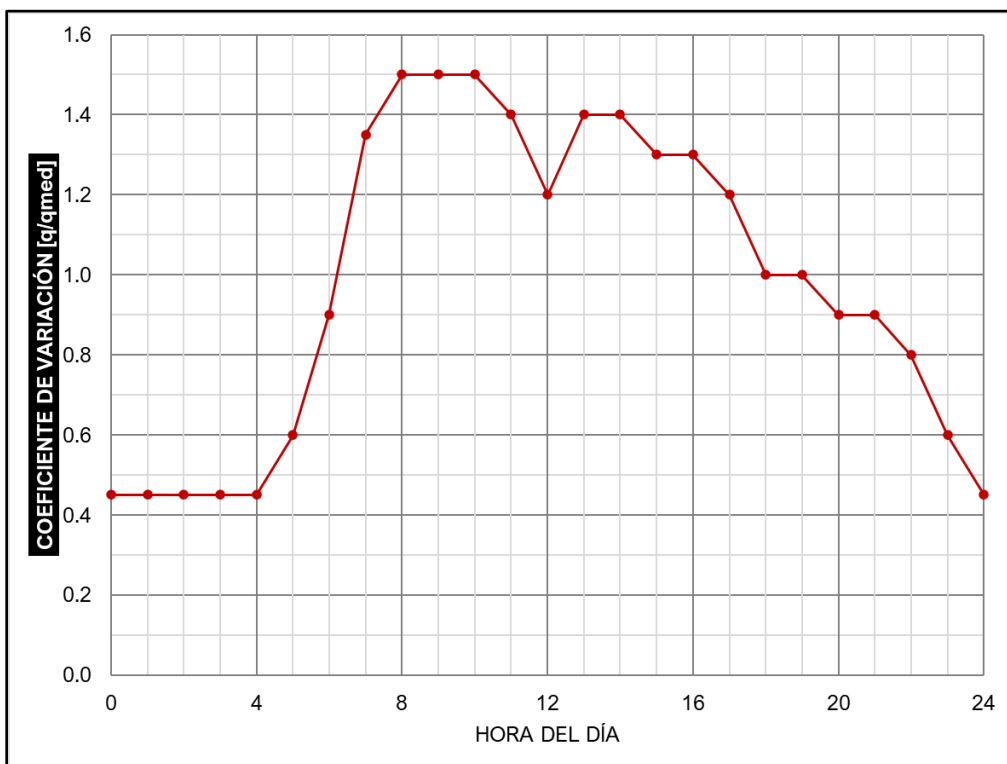


Gráfico 4. Coeficientes de variación horaria para pequeñas comunidades

I.5. Importancia de los registros de presión de las estaciones medidoras

Las estaciones medidoras, ubicadas estratégicamente, tienen como propósito medir y monitorear parámetros relacionados con el flujo del agua potable. Estas estaciones están enlazadas con sistemas de telemetría, lo que permite recopilar datos en tiempo real a intervalos regulares. Dicha interconexión facilita una supervisión continua y eficiente del sistema, permitiendo una rápida respuesta ante cualquier anomalía o variación en los parámetros bajo observación.

Las estaciones cuentan con dispositivos como manómetros para registrar los valores de presión dentro de la red de distribución. Además de la presión, algunas estaciones pueden medir el caudal de agua mediante medidores que registran la cantidad de agua que fluye a través de la red.

Estos registros proporcionan una visión detallada del comportamiento de variables como la presión, el gasto, la velocidad, el nivel piezométrico y la pérdida de carga en la red de distribución de agua potable. Esto es esencial para garantizar un suministro de agua confiable y eficiente. En primer lugar, este monitoreo contribuye directamente a la eficiencia operativa del sistema, permitiendo prevenir problemas como bajos caudales o cortes en el suministro de agua. Esto asegura un flujo de agua constante y sin obstáculos en toda la red.

Además, la identificación de posibles problemas, como fugas, roturas de tuberías o alguna falla en la red, se facilita cuando se monitorean de manera constante los registros de estas estaciones. La detección temprana de estos problemas permite tomar medidas inmediatas para evitar daños mayores y costosas reparaciones.

Los registros de presión brindan la capacidad de detectar anomalías en el sistema. Presiones excesivamente altas o bajas pueden indicar problemas en la red que requieren atención inmediata. Esta capacidad de identificar rápidamente cualquier alteración en el comportamiento de la presión es esencial para mantener un suministro de agua confiable y de alta calidad.

Por último, la comprensión del comportamiento de la presión en conjunto con el nivel piezométrico es esencial para la planificación a largo plazo. Ayuda en un futuro a la expansión de la red de distribución y a la toma de decisiones informadas sobre inversiones en infraestructura. Con datos precisos sobre cómo se comporta el sistema a lo largo del tiempo, es posible diseñar estrategias efectivas para garantizar un suministro de agua potable sostenible y de alta calidad para la comunidad.

II. DISPONIBILIDAD DE REGISTROS

II.1. Recopilación y procesamiento de los datos

Los datos que usé en la tesis son valores de la presión registrados automáticamente por las estaciones a cada hora, todos los días, y enviados directamente a la plataforma de información de registro, donde están agrupados en reportes mensuales. Los reportes mensuales que recopilé fueron a partir del mes de diciembre de 2019 hasta junio de 2023, sumando un total de 43 meses, siendo 1,308 días continuos con registros a cada hora, generando un total de 31,392 datos por estación de presión.

Las estaciones de presión que seleccioné fueron la estación de Amores, Repúblicas y Universidad, debido a la cercanía que existe entre ellas. La información de las tres estaciones resultó en una recopilación total de 94,176 datos de presiones registradas. Dicho recuento lo resumí en la tabla 5.

Tabla 5. Datos recopilados en las estaciones de presión seleccionadas (Diciembre 2019 – Junio 2023)

| Reportes Mensuales | Total de Días | Mediciones al Día | Estaciones Medidoras de Presión | Mediciones Recopiladas por Estación | Total de Mediciones Recopiladas |
|--------------------|---------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 43 | 1,308 | 24 | Amores, Repúblicas y Universidad | 31,392 | 94,176 |

Los reportes mensuales presentan los valores de la presión en una matriz, en la cual cada fila representa los registros tomados en cada día del mes, mientras que las columnas reflejan las horas del día. En la tabla C- 1 se muestra cómo está organizada la información en los reportes mensuales de las estaciones de presión, únicamente le agregué un poco de formato. Además de los valores de presión, el reporte mensual incluye el promedio, el valor máximo y el valor mínimo por hora y por día. Sin embargo, esta información en realidad resultó ser de poca relevancia para este trabajo debido a la presencia de valores repetitivos o extremos que modificaban estos estadísticos descriptivos, por lo que más adelante decidí llevar a cabo un ajuste en los datos para realizar un análisis más preciso y significativo.

Con el fin de optimizar el procesamiento de los datos, organicé todos los valores recopilados en tres columnas en una hoja de Excel como se muestra en la tabla 6. La primera columna indica la fecha y hora de la medición, la segunda columna identifica la estación correspondiente, y la tercera columna muestra la presión en kg/cm^2 .

Tabla 6.Valores recopilados acomodados

| FECHA | ESTACIÓN | PRESIÓN [kg/cm ²] |
|----------------|-------------|-------------------------------|
| 01/12/19 00:00 | UNIVERSIDAD | 0 |
| 01/12/19 01:00 | UNIVERSIDAD | 0 |
| 01/12/19 02:00 | UNIVERSIDAD | 0 |
| 01/12/19 03:00 | UNIVERSIDAD | 0 |
| 01/12/19 04:00 | UNIVERSIDAD | 0 |
| 01/12/19 05:00 | UNIVERSIDAD | 0 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |

Seguí añadiendo columnas, que incluyen el año, mes, día, día de la semana y hora correspondiente a cada medición de presión, como se presentan en la tabla 7, con el fin de tener más campos al momento de graficar y comparar la información. Por la gran cantidad de datos, estos valores los obtuve a partir de la fecha y hora utilizando funciones de Excel.

Tabla 7.Valores recopilados acomodados con columnas derivadas de la fecha y hora

| FECHA | ESTACIÓN | PRESIÓN [kg/cm ²] | AÑO | MES | DÍA DE LA SEMANA | DÍA | HORA |
|----------------|-------------|-------------------------------|------|-----------|------------------|-----|------|
| 01/12/19 00:00 | UNIVERSIDAD | 0 | 2019 | Diciembre | Domingo | 1 | 0 |
| 01/12/19 01:00 | UNIVERSIDAD | 0 | 2019 | Diciembre | Domingo | 1 | 1 |
| 01/12/19 02:00 | UNIVERSIDAD | 0 | 2019 | Diciembre | Domingo | 1 | 2 |
| 01/12/19 03:00 | UNIVERSIDAD | 0 | 2019 | Diciembre | Domingo | 1 | 3 |
| 01/12/19 04:00 | UNIVERSIDAD | 0 | 2019 | Diciembre | Domingo | 1 | 4 |
| 01/12/19 05:00 | UNIVERSIDAD | 0 | 2019 | Diciembre | Domingo | 1 | 5 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

De la misma manera, con las columnas anteriores, derivé nuevos campos mediante funciones y condicionales de Excel para más adelante comparar períodos más amplios y continuos, como lo son semestres, cuatrimestres, trimestres, bimestres y semanas. Estos nuevos campos se muestran en la tabla 8.

Tabla 8.Valores recopilados con campos de períodos más amplios

| FECHA | ESTACIÓN | PRESIÓN [kg/cm ²] | SEMESTRE | CUATRIMESTRE | TRIMESTRE | BIMESTRE | SEMANA |
|----------------|-------------|-------------------------------|----------|--------------|-----------|----------|-------------------------|
| 01/12/19 00:00 | UNIVERSIDAD | 0 | Jul-Dic | Sep-Dic | Oct-Dic | Nov-Dic | Semana 2019 1/12 - 7/12 |
| 01/12/19 01:00 | UNIVERSIDAD | 0 | Jul-Dic | Sep-Dic | Oct-Dic | Nov-Dic | Semana 2019 1/12 - 7/12 |
| 01/12/19 02:00 | UNIVERSIDAD | 0 | Jul-Dic | Sep-Dic | Oct-Dic | Nov-Dic | Semana 2019 1/12 - 7/12 |
| 01/12/19 03:00 | UNIVERSIDAD | 0 | Jul-Dic | Sep-Dic | Oct-Dic | Nov-Dic | Semana 2019 1/12 - 7/12 |
| 01/12/19 04:00 | UNIVERSIDAD | 0 | Jul-Dic | Sep-Dic | Oct-Dic | Nov-Dic | Semana 2019 1/12 - 7/12 |
| 01/12/19 05:00 | UNIVERSIDAD | 0 | Jul-Dic | Sep-Dic | Oct-Dic | Nov-Dic | Semana 2019 1/12 - 7/12 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

II.2. Ajuste para consistencia de los datos

Una vez recopilados todos los datos, realicé un ajuste de los valores de presión por estación. Los criterios que definí para realizarlo fueron los siguientes:

- Eliminación de los valores de presión de 0 [kg/cm²].
- Eliminación de los valores de presión que fueran igual al mínimo de la estación, en caso de que la frecuencia de aparición de este valor sea la más alta y no mantenga una proporción adecuada en relación con la frecuencia de los valores más repetidos que le siguieran.
- Eliminación de los valores mínimos y máximos de la estación que no concuerden con el comportamiento de las mediciones previas y posteriores a estos.

El primer criterio lo establecí debido a que los reportes mensuales contenían registros de presión iguales a 0 [kg/cm²]. Esto se debía a que la estación de presión no había realizado ninguna medición en la fecha y hora correspondiente al registro, por lo que el sistema en su lugar lo registró como una presión de 0 [kg/cm²]. Este valor no tiene relevancia en el contexto del análisis, por lo que lo excluí.

Para el segundo criterio me basé en que cada estación tiene un umbral mínimo de medición de carga de presión. Cuando la presión es inferior al valor mínimo, el sistema de registro interpreta ese valor como la carga de presión mínima de la estación. Sin embargo, existe la posibilidad de que el valor medido sea exactamente igual al mínimo, por lo que era necesario evaluar si la frecuencia del valor mínimo era coherente con las frecuencias de los valores mayores siguientes.

Determiné el valor mínimo de presión registrado en cada estación (0.3, 0.31 y 0.285 para Amores, Repúblicas y Universidad, respectivamente). Excluyendo el valor de 0 [kg/cm²] de las presiones, realicé un recuento de los valores más frecuentes y los comparé con el valor mínimo de cada estación (tabla 9). En todas las estaciones, el valor mínimo no solo fue el más repetido, sino que su frecuencia no guardaba una relación adecuada con respecto a la frecuencia de los demás valores más repetidos, por lo cual fueron eliminados.

Tabla 9. Valores de presión frecuentes en los datos recopilados, omitiendo el valor 0

| AMORES | | ESTACIÓN REPÚBLICAS | | UNIVERSIDAD | |
|---------------|------------|----------------------------|------------|--------------------|------------|
| VALOR | FRECUENCIA | VALOR | FRECUENCIA | VALOR | FRECUENCIA |
| 0.3 | 13,366 | 0.31 | 2,178 | 0.285 | 10,441 |
| 0.31 | 325 | 0.4 | 341 | 0.305 | 311 |
| 0.32 | 316 | 0.39 | 288 | 0.295 | 296 |
| 0.33 | 167 | 0.38 | 264 | 0.315 | 280 |
| 0.30083 | 67 | 0.42 | 238 | 0.345 | 107 |

Respecto al tercer criterio, fue necesario verificar que los valores extremos fueran coherentes con el comportamiento general de la presión. Analicé los datos alrededor de los máximos y mínimos de presión que destacaban en comparación con el resto. En este caso, examiné detenidamente cinco valores extremos de cada estación que eran los más evidentes y, después del análisis, confirmé que el comportamiento de la presión estaba en línea con estos valores, por lo que no excluí ninguno de ellos.

Al concluir este proceso y considerando los criterios establecidos, opté por omitir los valores de presión registrados en el año 2019. La decisión se basó en que estos registros eran discontinuos y se limitaban a los últimos diez días de dicho año. Esto implicaba que no contaba con una muestra representativa para el análisis del 2019, y además afectaría la evaluación del mes de diciembre, introduciendo alteraciones en los estadísticos descriptivos.

Tras el ajuste, la cantidad de datos que usé para el cálculo del nivel piezométrico y el análisis estadístico se muestra en la tabla 10 y 11.

Tabla 10. Cantidad de datos recopilados por hora en cada estación

| HORA | ESTACIÓN | | |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| | AMORES | REPÚBLICAS | UNIVERSIDAD |
| 0 | 155 | 1,093 | 870 |
| 1 | 158 | 1,114 | 921 |
| 2 | 167 | 1,132 | 959 |
| 3 | 195 | 1,152 | 998 |
| 4 | 280 | 1,172 | 1,015 |
| 5 | 641 | 1,246 | 1,032 |
| 6 | 1,110 | 1,254 | 1,025 |
| 7 | 1,222 | 1,255 | 1,012 |
| 8 | 1,234 | 1,257 | 955 |
| 9 | 1,237 | 1,261 | 841 |
| 10 | 1,238 | 1,260 | 703 |
| 11 | 1,240 | 1,259 | 625 |
| 12 | 1,237 | 1,255 | 606 |
| 13 | 1,217 | 1,248 | 645 |
| 14 | 1,190 | 1,232 | 684 |
| 15 | 1,084 | 1,185 | 702 |
| 16 | 947 | 1,154 | 719 |
| 17 | 749 | 1,117 | 724 |
| 18 | 567 | 1,099 | 730 |
| 19 | 365 | 1,079 | 743 |
| 20 | 282 | 1,069 | 760 |
| 21 | 198 | 1,062 | 781 |
| 22 | 163 | 1,056 | 796 |
| 23 | 151 | 1,071 | 828 |
| TOTAL | 17,027 | 28,082 | 19,674 |

Tabla 11. Cantidad total de datos por estación

| | ESTACIÓN | | | TOTAL |
|--------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------|
| | <i>AMORES</i> | <i>REPÚBLICAS</i> | <i>UNIVERSIDAD</i> | |
| DATOS | 17,027 | 28,082 | 19,674 | 64,783 |

II.3. Importancia del ajuste de los datos

El anterior ajuste de los datos lo realicé con el fin de obtener resultados consistentes. Esta etapa de limpieza y filtrado aseguró a que no trabajara con datos incorrectos e incoherentes que distorsionen las medidas de tendencia central, como la media o la mediana. También disminuyó la variabilidad en el conjunto de datos, lo que podría llevar a interpretaciones erróneas.

Para resaltar la importancia del ajuste, generé el gráfico 5 que compara las medias mensuales de presión antes y después del proceso en la estación Amores, la cual resultó ser la estación que experimentó el mayor ajuste en sus datos.

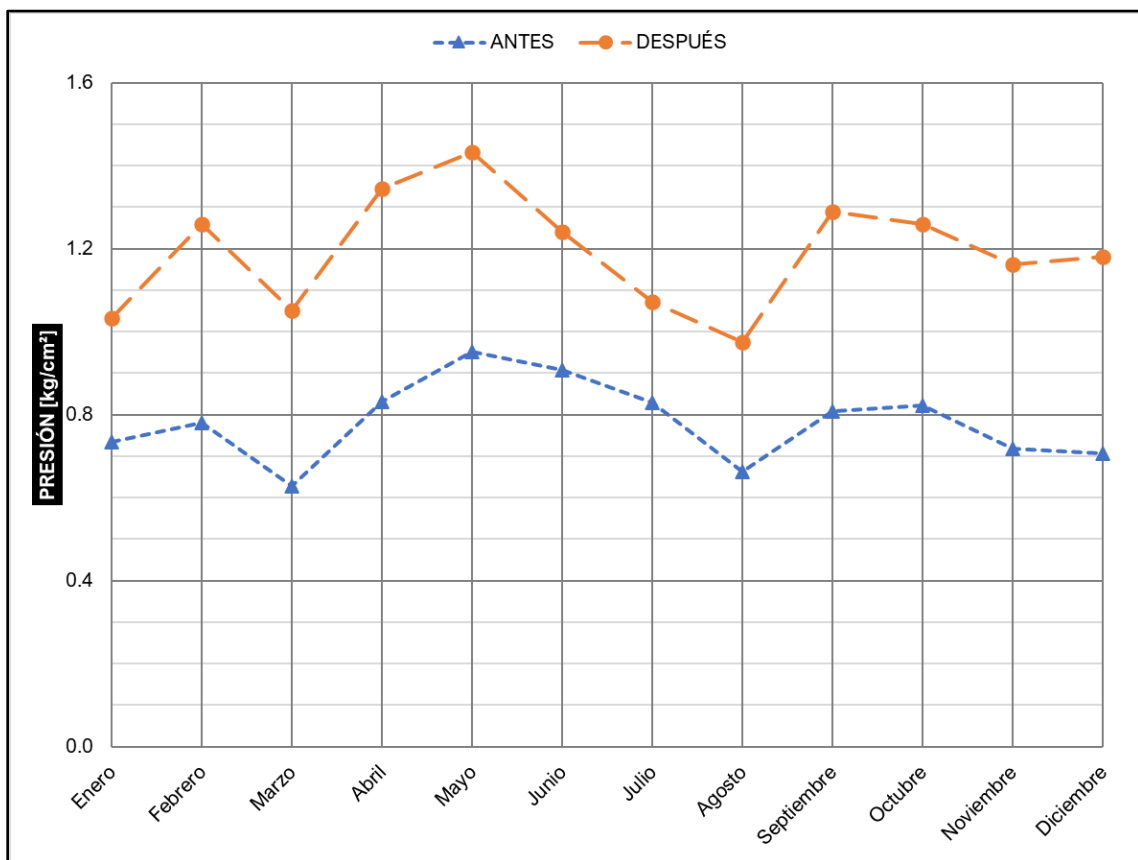


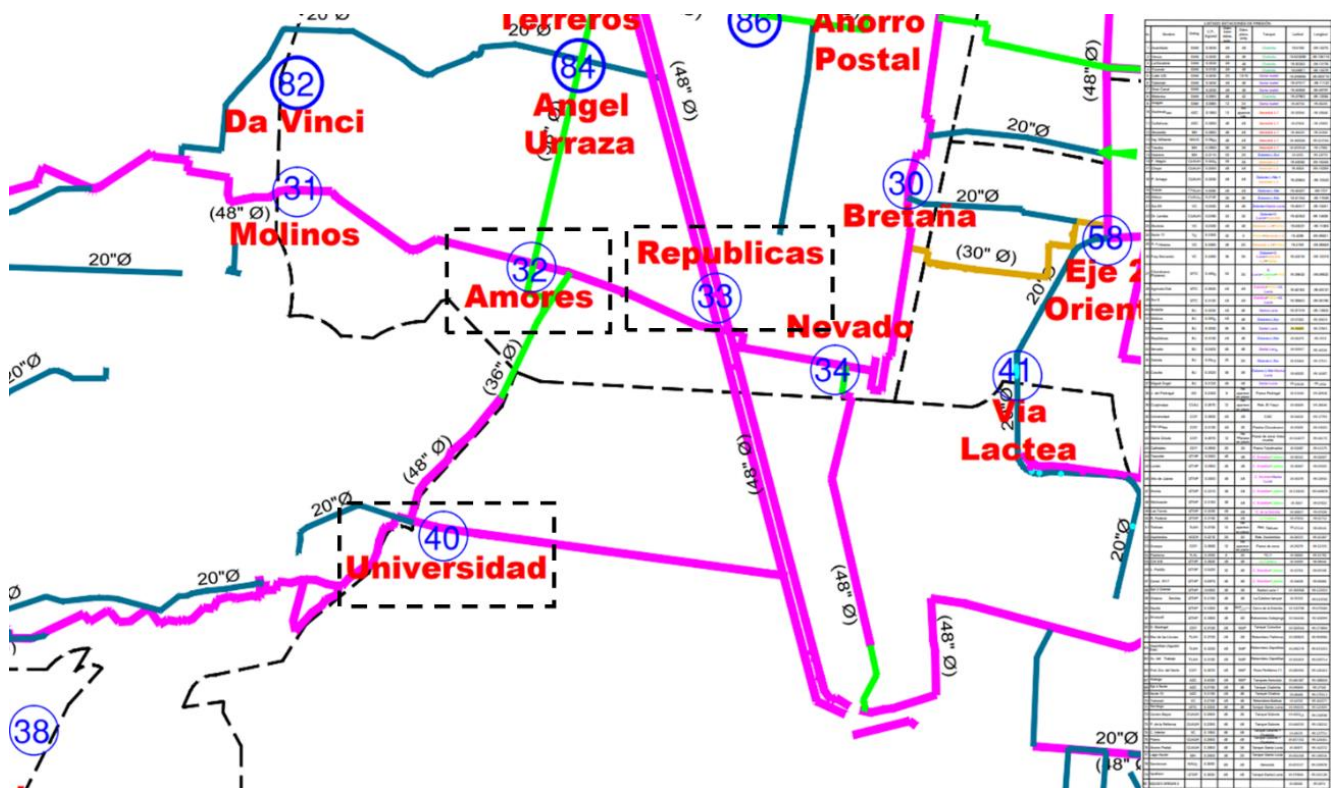
Gráfico 5. Promedio mensual de las presiones en la estación Amores antes y después de la depuración (Enero 2020 – Junio 2023)

En términos generales, el gráfico muestra que las medias de presión posteriores al ajuste son más altas que las medias anteriores en cada mes. Este cambio evidencia cómo los datos depurados han influido en la mejora de la calidad y confiabilidad de los resultados.

II.4. Modelo digital de elevación de las estaciones de presión

Creé un Modelo Digital de Elevación (MDE) que incluye las estaciones de presión en estudio para obtener la elevación de cada una y posteriormente calcular el nivel piezométrico asociado a cada medición de presión de dichas estaciones. Además, agregué el tanque de distribución de agua potable asociado a cada estación, junto con su respectiva tubería para trazar la línea piezométrica respecto al perfil de elevaciones de la tubería que va desde el tanque hasta la estación.

Primero, localicé las estaciones de presión de Amores, Repúblicas y Universidad utilizando el “Plano General 97 Estaciones de Presiones Red Primaria” (ilustración A-1 del anexo A, ilustración 8). En la siguiente ilustración enfoqué las estaciones analizadas.



(Fuente: SACMEX, Dirección de Tecnologías, Subdirección de Proceso, Análisis y Acceso a la Información)

Ilustración 8. Captura del “Plano General 97 Estaciones de Presiones Red Primaria” haciendo una ampliación en la ubicación de las estaciones de presión Amores, Repúblicas y Universidad

Este plano, además de proporcionar un esquema de las estaciones y de la red primaria de la ciudad, contiene un listado con información detallada de las estaciones de presión. Este listado incluía el nombre de la estación, la alcaldía correspondiente, la carga de presión mínima detectable, los diámetros base y plano, el nombre del tanque de distribución relacionado, así como las coordenadas de latitud y longitud de cada estación. La información relevante extraída de este listado lo muestra la tabla 12 de manera organizada.

Tabla 12. Ubicación geográfica, diámetro y tanque asociado de las estaciones seleccionadas

| | ESTACIÓN | | |
|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | AMORES | REPÚBLICAS | UNIVERSIDAD |
| LONGITUD | -99.171 | -99.155 | -99.178 |
| LATITUD | 19.367 | 19.365 | 19.346 |
| DIÁMETRO [in] | 36 | 48 | 48 |
| TANQUE | SANTA LUCÍA | DOLORES NORTE | CAO |

Mediante el programa QGIS, un Sistema de Información Geográfica (SIG), procedí a georreferenciar tanto las estaciones de presión como los tanques de distribución asociados a estas. Una vez georreferenciados en QGIS continué a superponerlos en el "Plano General 97 Estaciones de Presiones Red Primaria" para trazar en distintas capas las tuberías que conectan los tanques con las estaciones, resultando en la ilustración 9.

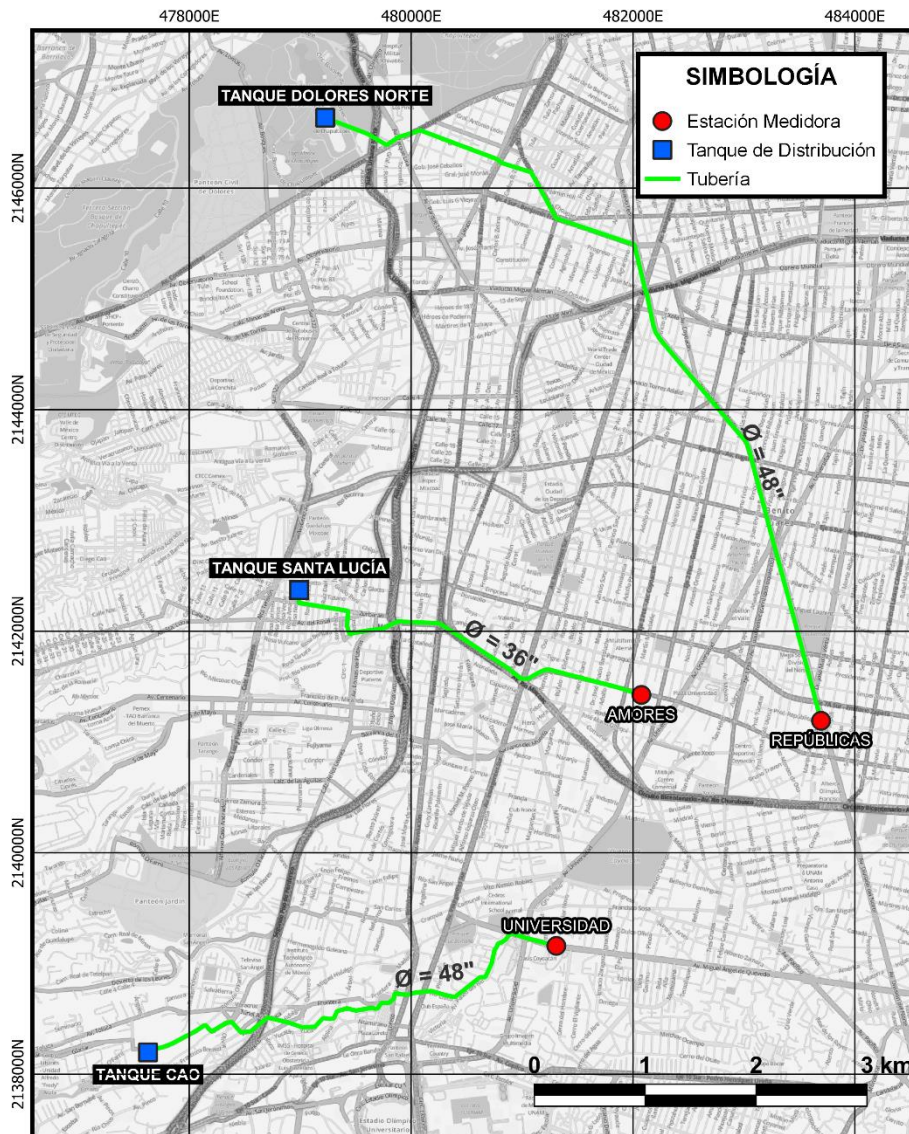


Ilustración 9. Mapa de la ubicación de las estaciones y de los tanques de distribución con su respectiva tubería

Una vez que georreferencié estos elementos y tracé la tubería, obtuve los archivos tipo ASCII escala 1:10 000 E14A39B3, E14A39B4, E14A39E1 y E14A39E2, que contienen los MDE de la zona correspondiente. Estos MDE, con una resolución de 1.5 metros y edición 2020, los descargué a través del sitio web del INEGI en la sección de “Relieve Continental”. Posteriormente, estos MDE los añadí al archivo creado en QGIS para generar un mapa hipsométrico con las estaciones de presión y los tanques de distribución (Ilustración 10). Con toda esta información, extraje las elevaciones de las estaciones y de los tanques en la tabla 13.

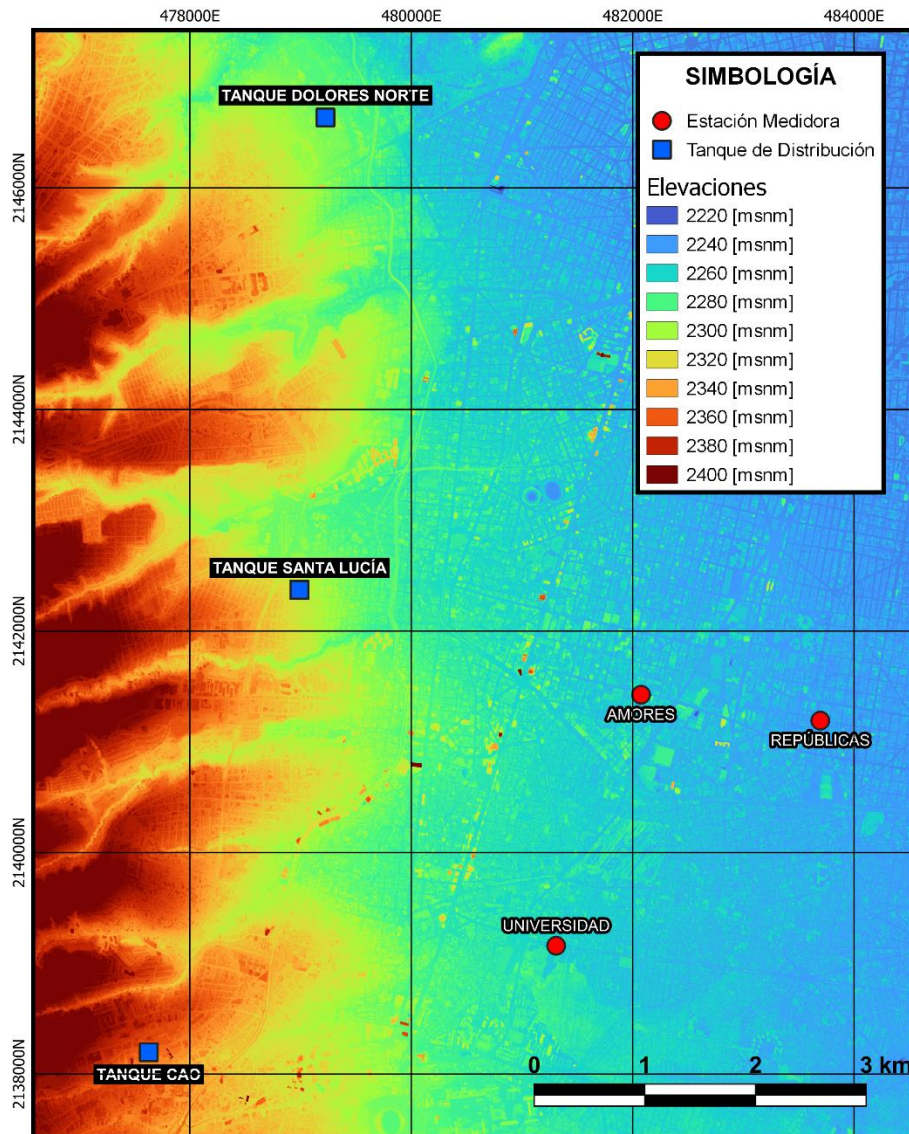


Ilustración 10. Mapa hipsométrico de la ubicación de las estaciones y sus tanques de distribución

Tabla 13. Elevación de cada estación de presión, elevación del tanque de distribución correspondiente junto con la longitud de la tubería

| | ESTACIÓN | | |
|-------------------------|-------------|---------------|-------------|
| | AMORES | REPÚBLICAS | UNIVERSIDAD |
| ELEVACIÓN [msnm] | 2248.352 | 2237.46 | 2265.09 |
| TANQUE | SANTA LUCÍA | DOLORES NORTE | CAO |
| ELEV. DEL TANQUE [msnm] | 2311.11 | 2291.06 | 2361.031 |
| LONG. DE TUBERÍA [m] | 3640 | 7941 | 4571 |

Además, gracias al trazado de la planta de la tubería (Ilustraciones 11, 12 y 13) desde el tanque hasta la estación de presión, logré obtener el perfil de elevaciones de cada uno (Gráficos 6, 7 y 8). Consideraré que el perfil del terreno de la planta de la tubería coincide con el perfil de elevaciones de la tubería, utilizando este último como el eje de conducción.

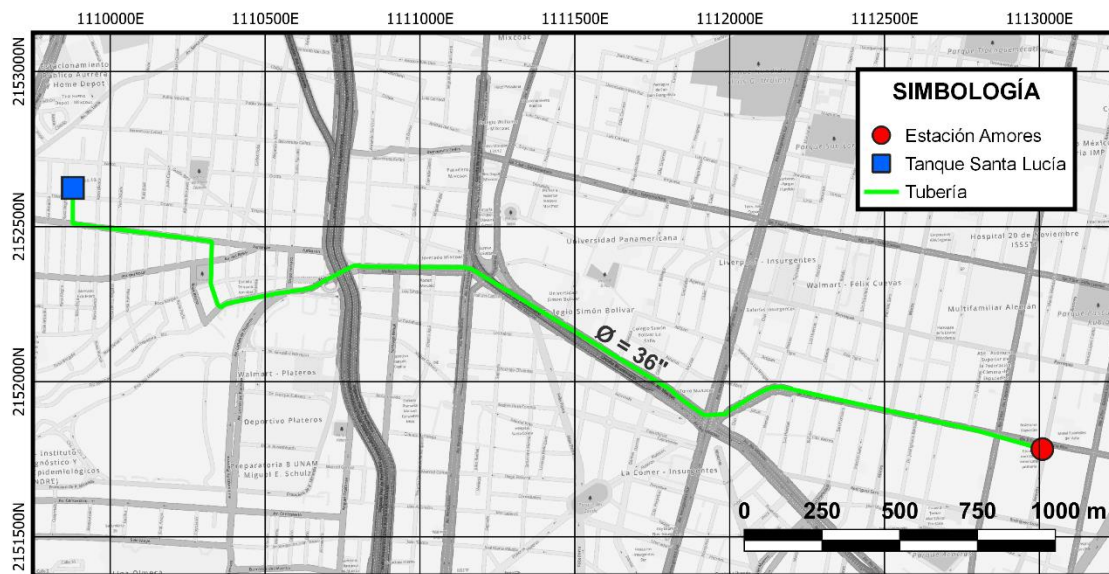


Ilustración 11. Planta de la tubería del tanque Santa Lucía a la estación Amores

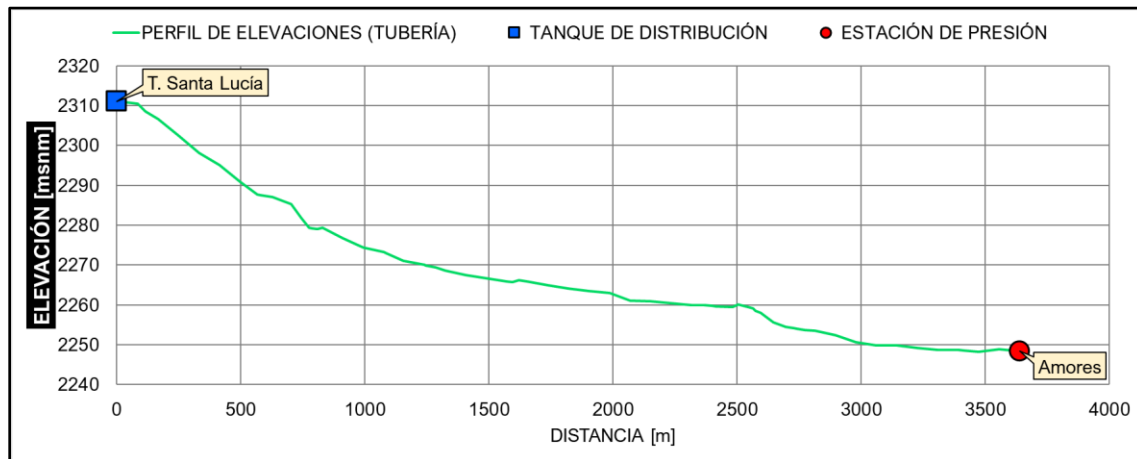


Gráfico 6. Perfil de elevaciones de la tubería del tanque Santa Lucía a la estación Amores



Ilustración 12. Planta de la tubería del tanque Dolores Norte a la estación República

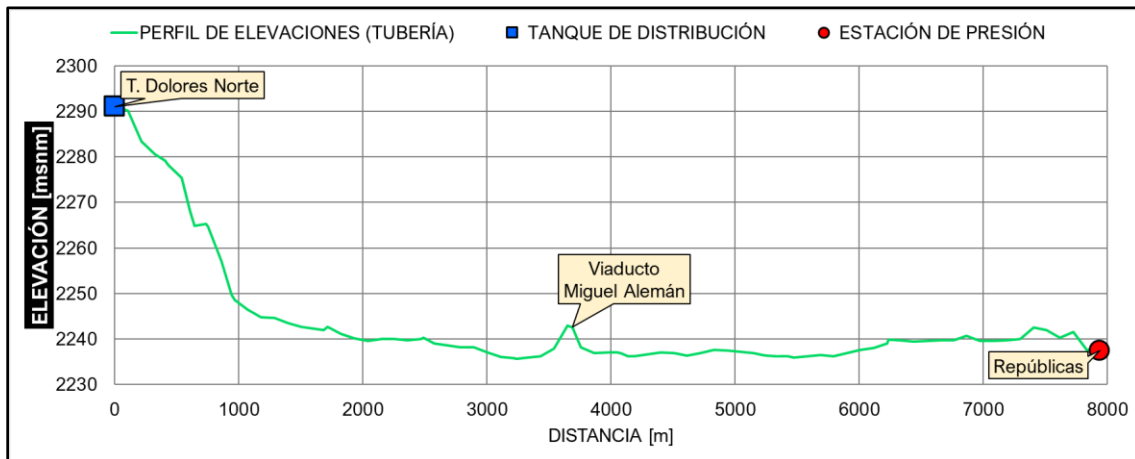


Gráfico 7. Perfil de elevaciones de la tubería del tanque Dolores Norte a la estación República

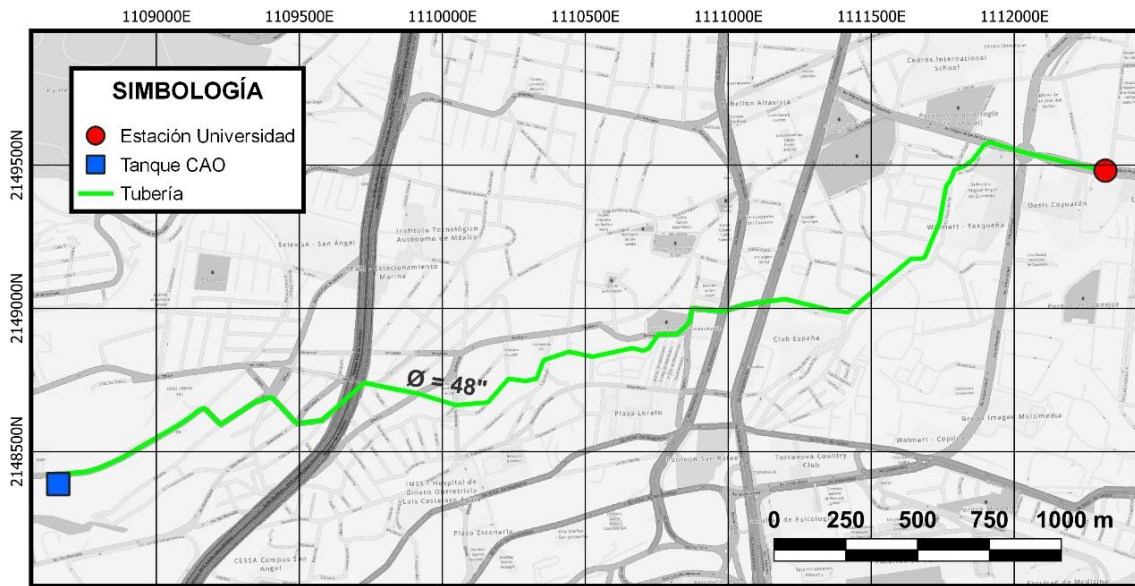


Ilustración 13. Planta de la tubería del tanque CAO a la estación Universidad

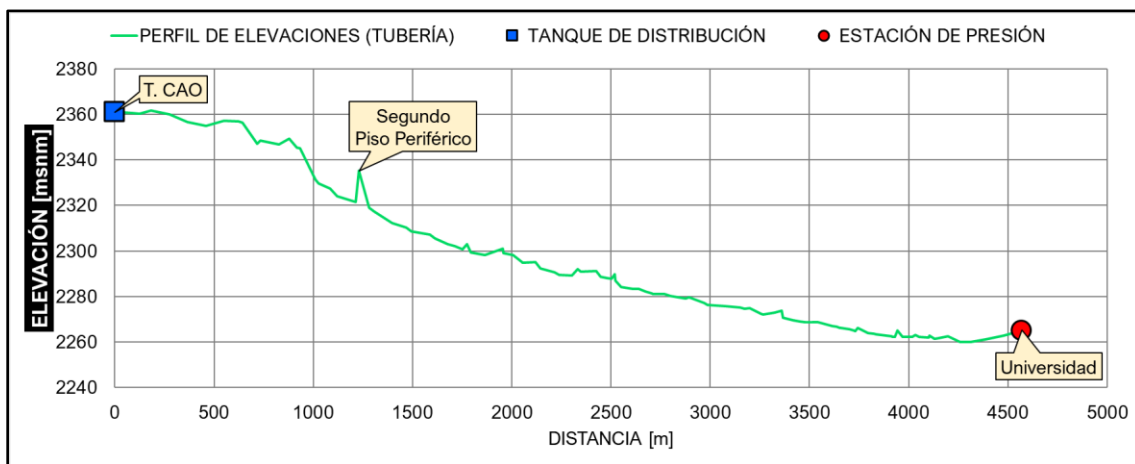


Gráfico 8. Perfil de elevaciones de la tubería del tanque CAO a la estación Universidad

II.5. Cálculo del nivel piezométrico

Utilizando las elevaciones de las estaciones obtenidas en el punto anterior y los valores de los registros ajustados, procedí al cálculo del nivel piezométrico para cada medición de presión. Antes de ello, es necesario mencionar que, la presión se expresa comúnmente en términos de la columna de un líquido, conocida como carga de presión. La relación entre la presión (p), el peso específico (γ), y la altura de la columna (h) se rige por la ecuación $p = \gamma h$. La carga de presión (h) se calcula como:

$$h = \frac{p}{\gamma}$$

En el sistema gravitacional, utilizando la unidad de fuerza kgf y con el peso específico del agua siendo 1000 kgf/m^3 . En este sistema es común expresar la presión en kgf/cm^2 . Entonces primero se debe hacer una conversión de kgf/cm^2 a kgf/m^2 . Por ejemplo:

$$A \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = A \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \times \frac{(100\text{cm})^2}{1\text{m}^2} = 10000A \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

Por ende, la carga de presión resulta:

$$h = \frac{p}{\gamma} = A \frac{10000 \text{ kgf/m}^2}{1000 \text{ kgf/m}^3} \quad \therefore \quad h = 10A \text{ m.c.a.}$$

Con ello, finalmente apliqué la siguiente fórmula para calcular el nivel piezométrico correspondiente a cada medición. Por ejemplo:

$$\text{Nivel Piezométrico} = \text{Elevación de la Estación} + \text{Carga de Presión}$$

Estación Amores, medición 01/01/20 06:00 hrs:

$$\text{Nivel Piezométrico} = 2248.352 + 0.323(10) \approx 2251.579 \text{ [msnm]}$$

Estación Repúblicas, medición 18/04/21 10:00 hrs:

$$\text{Nivel Piezométrico} = 2237.46 + 0.983(10) \approx 2247.293 \text{ [msnm]}$$

Estación Universidad, medición 30/06/23 23:00 hrs:

$$\text{Nivel Piezométrico} = 2265.09 + 0.535(10) \approx 2270.440 \text{ [msnm]}$$

Tabla 14. Cálculo del nivel piezométrico en las diferentes estaciones

| FECHA | ESTACIÓN | AÑO | MES | DÍA DE LA SEMANA | DÍA | HORA | PRESIÓN [kg/cm ²] | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] |
|----------------|-------------|------|-------|------------------|-----|------|-------------------------------|---------------------------|
| 01/01/20 06:00 | AMORES | 2020 | Enero | Miércoles | 1 | 6 | 0.323 | 2251.579 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 18/04/21 10:00 | REPÚBLICAS | 2021 | Abril | Domingo | 18 | 10 | 0.983 | 2247.293 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 30/06/23 23:00 | UNIVERSIDAD | 2023 | Junio | Viernes | 30 | 23 | 0.535 | 2270.440 |

II.6. Análisis descriptivo de los registros de presión y de los niveles piezométricos

En esta sección, abordé el análisis descriptivo de los registros de presión y los niveles piezométricos recopilados y procesados. A través de este análisis, sintetice los datos en estadísticos descriptivos, proporcionando una visión general del comportamiento de la presión y el nivel piezométrico desde enero 2020 hasta junio 2023. Al mismo tiempo, este enfoque me permitió identificar patrones y aspectos fundamentales para la interpretación de los resultados.

Empleé la herramienta “Gráfico Dinámico y Tabla Dinámica” de Excel para llevar a cabo el análisis descriptivo. Ubicada en el menú "Insertar" dentro de la pestaña "Gráfico", esta herramienta la usé porque justamente resume los datos en valores estadísticos descriptivos ofreciendo una forma efectiva de presentar la información y brindar una representación visual precisa en gráficos y tablas. Sin dicha herramienta y sin las columnas creadas en el punto II.1, los valores de los gráficos de cada estación los presentaría de manera desorganizada (ver gráficos B-1, B-2 y B-3 del anexo B), dificultando la comparación del comportamiento de los valores entre estaciones y entre períodos de tiempo.

A través de esta herramienta, logré manipular y organizar los datos en sus respectivas columnas, las cuales pasaron a denominarse campos. Estos campos se pueden agregar, reorganizar o eliminar dependiendo los valores o el período de tiempo que se pretende presentar.

La herramienta “Gráfico Dinámico y Tabla Dinámica” tiene la capacidad de generar gráficos y tablas de manera rápida en función de los campos asignados a las áreas “Filtros”, “Campo de Eje” (Categorías), “Campo de Leyenda” (Serie) y “Valores”.

El área “Filtros” facilita el filtrado de informes conforme al elemento seleccionado. Por su parte, el área “Categorías” permite mostrar los campos como ejes en el gráfico, mientras que el área “Serie” se emplea para mostrarlos en la leyenda del gráfico. Por último, el área “Valores” resume los datos numéricos a través de ciertos cálculos.

Los cálculos disponibles en el área “Valores” incluyen suma, recuento, promedio, máximo, mínimo, producto, contar números, desviación estándar muestral y poblacional, y varianza muestral y poblacional. Para este análisis, opté por utilizar únicamente los cálculos de promedio y desviación estándar poblacional.

El promedio o media ofrece un valor central del conjunto de datos. La desviación estándar poblacional, por su parte, mide la dispersión o variabilidad alrededor de la media, expresándola en las mismas unidades de los datos.

II.6.A. Gráficos y tablas generales

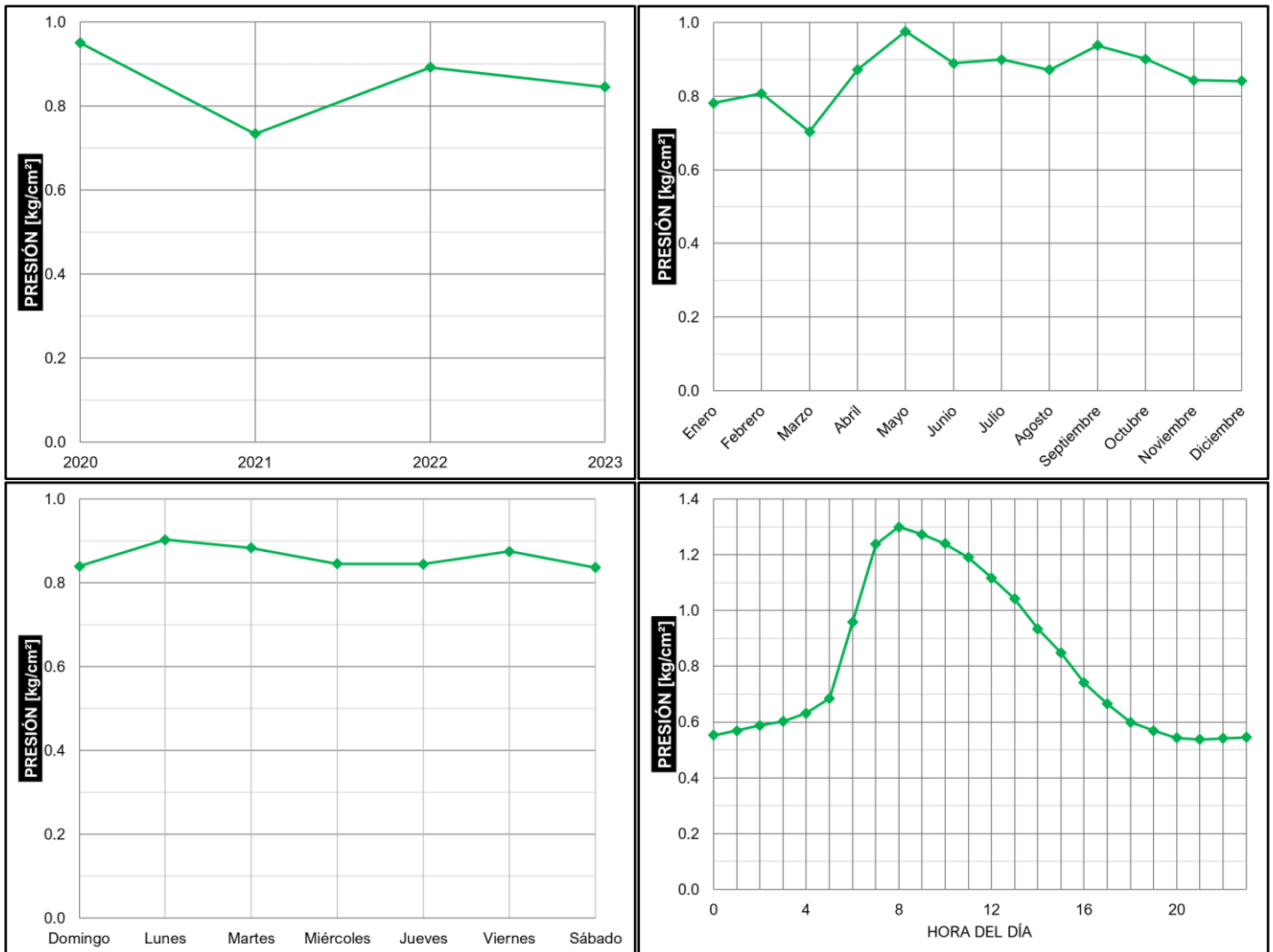


Gráfico 9a, 9b, 9c y 9d. Promedios generales de presión por año, por mes, por día de la semana y por hora respectivamente (Enero 2020 – Junio 2023)

Tabla 15. Promedios máximos y mínimos de presión por año, mes, día de la semana y hora de los datos en conjunto (Enero 2020 – Junio 2023)

| | PRESIÓN [kg/cm²] | | | |
|------------------------|------------------|-------------|---------------|--------------|
| | Anual | Mensual | Día de la Sem | Horario |
| Promedio Máximo | 0.951 (2020) | 0.976 (May) | 0.902 (Lun) | 1.300 (08 h) |
| Promedio Mínimo | 0.734 (2021) | 0.704 (Mar) | 0.836 (Sáb) | 0.538 (21 h) |

Tabla 16.Desviación estándar de las presiones [kg/cm²] por año, mes, día y hora de los datos en conjunto

| AÑO | | | | | | | |
|---------|---------|------------|-----------|-----------|-----------|--------|-------|
| 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | | | | |
| 0.498 | 0.425 | 0.533 | 0.540 | | | | |
| MES | | | | | | | |
| Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | | |
| 0.449 | 0.460 | 0.390 | 0.532 | 0.535 | 0.555 | | |
| MES | | | | | | | |
| Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | | |
| 0.506 | 0.424 | 0.540 | 0.517 | 0.517 | 0.513 | | |
| DÍA | | | | | | | |
| Domingo | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | |
| 0.497 | 0.520 | 0.513 | 0.488 | 0.490 | 0.506 | 0.505 | |
| HORA | | | | | | | |
| 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 |
| 0.273 | 0.089 | 0.099 | 0.101 | 0.143 | 0.243 | 0.495 | 0.528 |
| HORA | | | | | | | |
| 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 0.608 | 0.581 | 0.535 | 0.503 | 0.482 | 0.467 | 0.442 | 0.422 |
| HORA | | | | | | | |
| 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| 0.371 | 0.336 | 0.292 | 0.270 | 0.253 | 0.251 | 0.257 | 0.266 |

II.6.B. Gráficos y tablas por estación

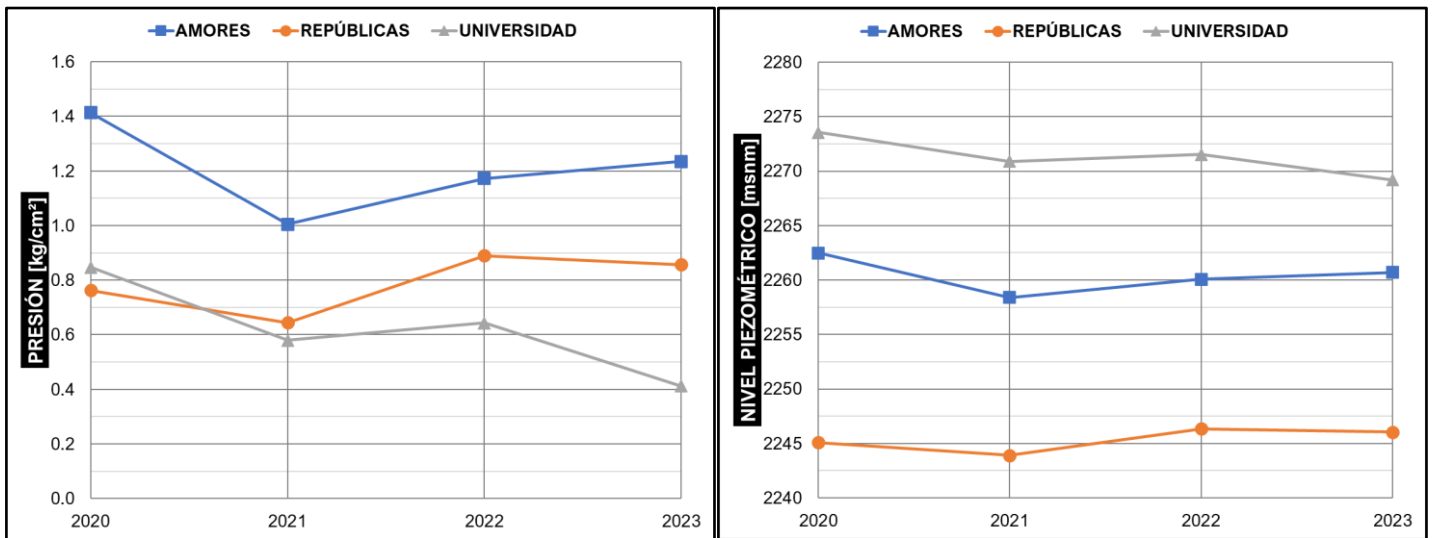


Gráfico 10a y 10b.Promedios anuales de presión y del nivel piezométrico por estación (Enero 2020 – Junio 2023)

Tabla 17. Promedios máximos y mínimos en cada estación del gráfico 10a y 10b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | |
|------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|---------------------------|-------------|-------------|
| | Amores | Repúblicas | Universidad | Amores | Repúblicas | Universidad |
| Promedio Máximo | 1.413 (2020) | 0.890 (2022) | 0.847 (2020) | 2262 (2020) | 2246 (2022) | 2274 (2020) |
| Promedio Mínimo | 1.005 (2021) | 0.644 (2021) | 0.412 (2023) | 2258 (2021) | 2244 (2021) | 2269 (2023) |

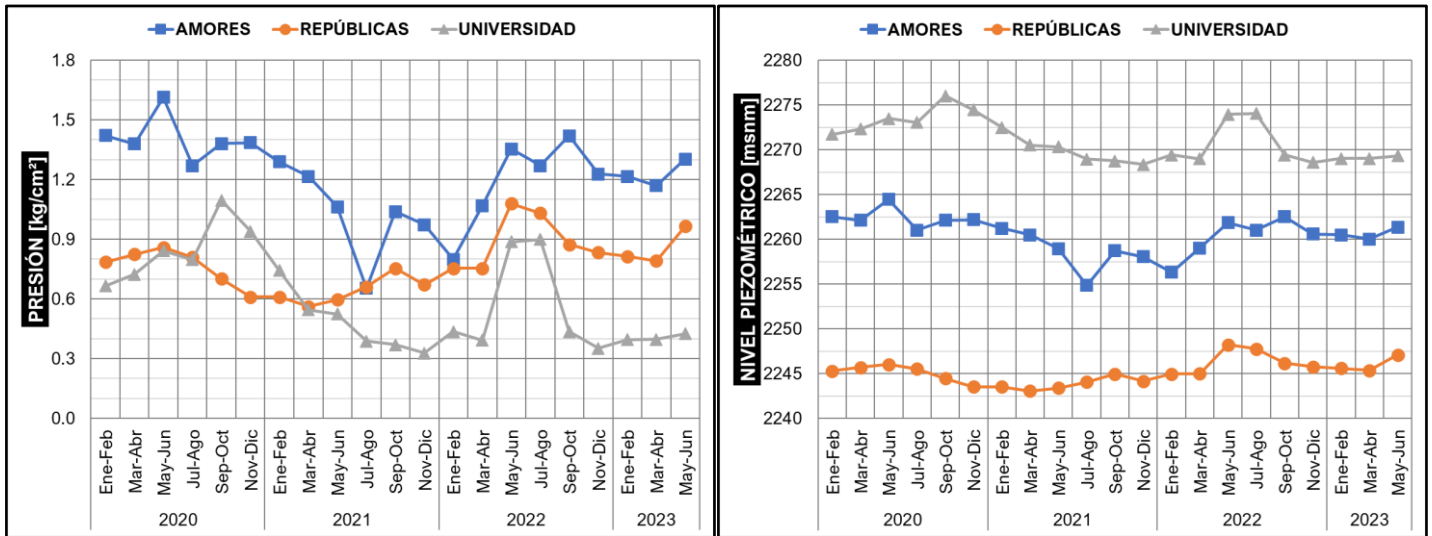


Gráfico 11a y 11b. Promedios bimestrales de presión y del nivel piezométrico por estación (Enero 2020 – Junio 2023)

Tabla 18. Promedios máximos y mínimos en cada estación del gráfico 11a y 11b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | |
|------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|----------------|----------------|
| | Amores | Repúblicas | Universidad | Amores | Repúblicas | Universidad |
| AÑO 2020 | | | | | | |
| Promedio Máximo | 1.613 (May-Jun) | 0.859 (May-Jun) | 1.096 (Sep-Oct) | 2264 (May-Jun) | 2246 (May-Jun) | 2276 (Sep-Oct) |
| Promedio Mínimo | 1.270 (Jul-Ago) | 0.609 (Nov-Dic) | 0.666 (Ene-Feb) | 2261 (Jul-Ago) | 2244 (Nov-Dic) | 2272 (Ene-Feb) |
| AÑO 2021 | | | | | | |
| Promedio Máximo | 1.289 (Ene-Feb) | 0.753 (Sep-Oct) | 0.744 (Ene-Feb) | 2261 (Ene-Feb) | 2245 (Sep-Oct) | 2273 (Ene-Feb) |
| Promedio Mínimo | 0.654 (Jul-Ago) | 0.561 (Mar-Abr) | 0.328 (Nov-Dic) | 2255 (Jul-Ago) | 2243 (Mar-Abr) | 2268 (Nov-Dic) |
| AÑO 2022 | | | | | | |
| Promedio Máximo | 1.420 (Sep-Oct) | 1.079 (May-Jun) | 0.900 (Jul-Ago) | 2263 (Sep-Oct) | 2248 (May-Jun) | 2274 (Jul-Ago) |
| Promedio Mínimo | 0.799 (Ene-Feb) | 0.754 (Ene-Feb) | 0.351 (Nov-Dic) | 2256 (Ene-Feb) | 2245 (Ene-Feb) | 2269 (Nov-Dic) |
| AÑO 2023 | | | | | | |
| Promedio Máximo | 1.303 (May-Jun) | 0.965 (May-Jun) | 0.426 (May-Jun) | 2261 (May-Jun) | 2247 (May-Jun) | 2269 (May-Jun) |
| Promedio Mínimo | 1.170 (Mar-Abr) | 0.791 (Mar-Abr) | 0.395 (Ene-Feb) | 2260 (Mar-Abr) | 2245 (Mar-Abr) | 2269 (Ene-Feb) |

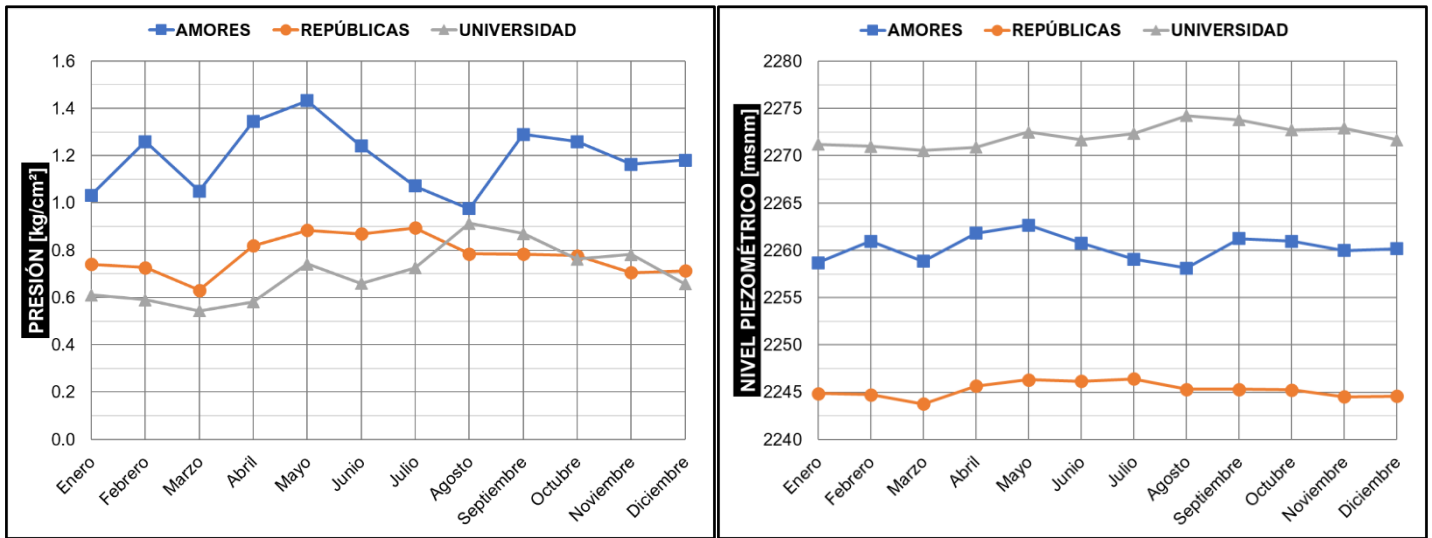
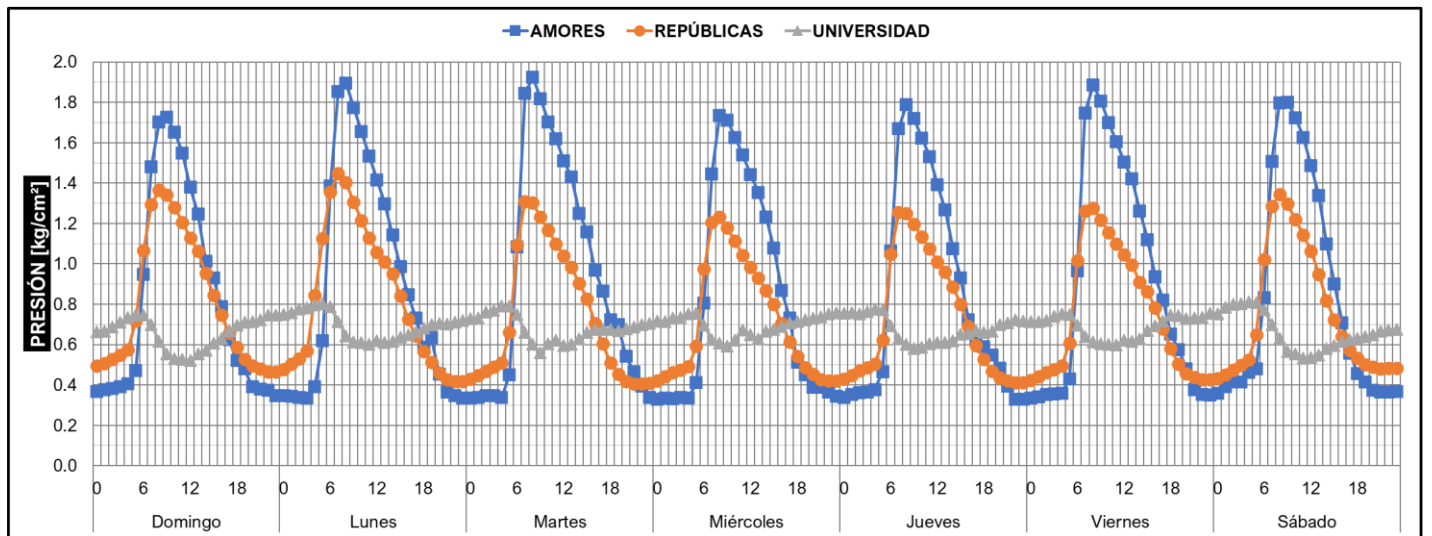


Gráfico 12a y 12b. Promedios mensuales de presión y del nivel piezométrico por estación (Enero 2020 – Junio 2023)

Tabla 19. Promedios máximos y mínimos en cada estación del gráfico 12a y 12b

| | PRESIÓN [kg/cm²] | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | |
|------------------------|------------------|-------------|-------------|---------------------------|------------|-------------|
| | Amores | Repúblicas | Universidad | Amores | Repúblicas | Universidad |
| Promedio Máximo | 1.432 (May) | 0.895 (Jul) | 0.914 (Ago) | 2263 (May) | 2246 (Jul) | 2274 (Ago) |
| Promedio Mínimo | 0.976 (Ago) | 0.631 (Mar) | 0.544 (Mar) | 2258 (Ago) | 2244 (Mar) | 2271 (Mar) |



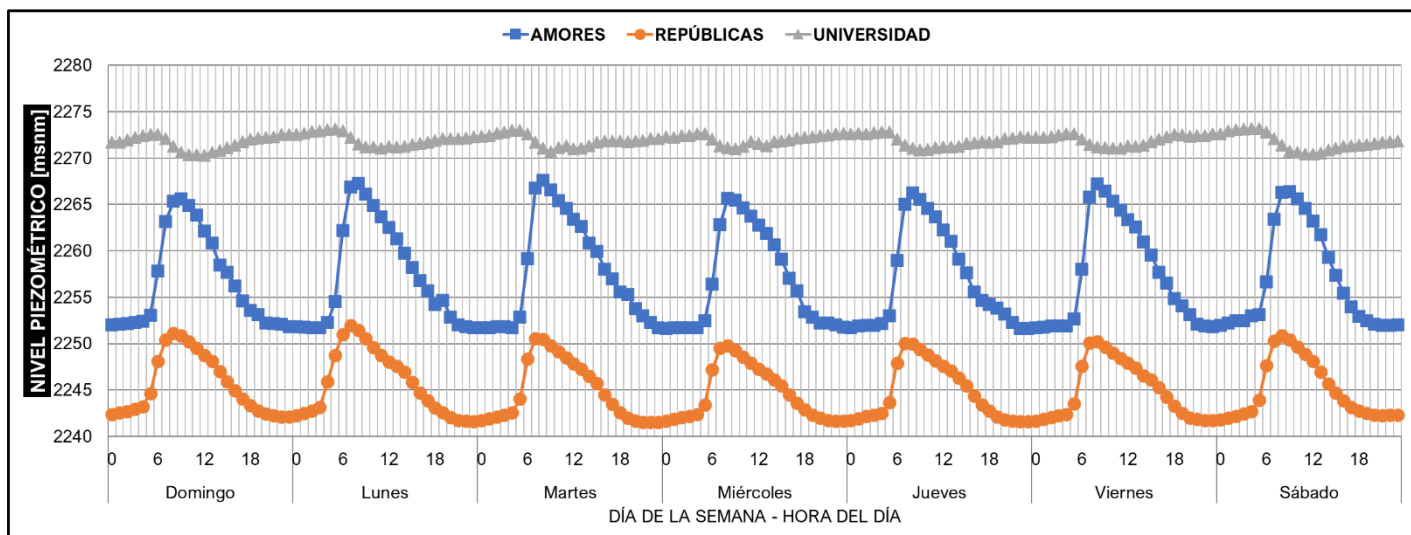


Gráfico 13a y 13b. Promedios horarios de presión y del nivel piezométrico por día de la semana y por estación (Enero 2020 – Junio 2023)

Tabla 20. Promedios máximos y mínimos en cada estación del gráfico 13a y 13b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | |
|------------------|-------------------------------|--------------|--------------|---------------------------|-------------|-------------|
| | Amores | Repúblicas | Universidad | Amores | Repúblicas | Universidad |
| DOMINGO | | | | | | |
| Promedio | 1.726 (09 h) | 1.365 (08 h) | 0.748 (05 h) | 2266 (09 h) | 2251 (08 h) | 2273 (05 h) |
| Máximo | | | | | | |
| Promedio | 0.348 (23 h) | 0.467 (23 h) | 0.521 (12 h) | 2252 (23 h) | 2242 (23 h) | 2270 (12 h) |
| Mínimo | | | | | | |
| LUNES | | | | | | |
| Promedio | 1.896 (08 h) | 1.448 (07 h) | 0.804 (05 h) | 2267 (08 h) | 2252 (07 h) | 2273 (05 h) |
| Máximo | | | | | | |
| Promedio | 0.334 (03 h) | 0.418 (23 h) | 0.602 (11 h) | 2252 (03 h) | 2242 (23 h) | 2271 (11 h) |
| Mínimo | | | | | | |
| MARTES | | | | | | |
| Promedio | 1.926 (08 h) | 1.310 (07 h) | 0.791 (05 h) | 2268 (08 h) | 2251 (07 h) | 2273 (05 h) |
| Máximo | | | | | | |
| Promedio | 0.335 (00 h) | 0.406 (22 h) | 0.560 (09 h) | 2252 (00 h) | 2242 (22 h) | 2271 (09 h) |
| Mínimo | | | | | | |
| MIÉRCOLES | | | | | | |
| Promedio | 1.735 (08 h) | 1.231 (08 h) | 0.757 (23 h) | 2266 (08 h) | 2250 (08 h) | 2273 (23 h) |
| Máximo | | | | | | |
| Promedio | 0.330 (00 h) | 0.420 (23 h) | 0.593 (09 h) | 2252 (00 h) | 2242 (23 h) | 2271 (09 h) |
| Mínimo | | | | | | |
| JUEVES | | | | | | |
| Promedio | 1.790 (08 h) | 1.256 (07 h) | 0.776 (04 h) | 2266 (08 h) | 2250 (07 h) | 2273 (04 h) |
| Máximo | | | | | | |
| Promedio | 0.330 (23 h) | 0.412 (22 h) | 0.582 (09 h) | 2252 (23 h) | 2242 (22 h) | 2271 (09 h) |
| Mínimo | | | | | | |
| VIERNES | | | | | | |
| Promedio | 1.885 (08 h) | 1.275 (08 h) | 0.756 (23 h) | 2267 (08 h) | 2250 (08 h) | 2273 (23 h) |
| Máximo | | | | | | |
| Promedio | 0.334 (00 h) | 0.424 (00 h) | 0.599 (11 h) | 2252 (00 h) | 2242 (00 h) | 2271 (11 h) |
| Mínimo | | | | | | |
| SÁBADO | | | | | | |
| Promedio | 1.801 (09 h) | 1.343 (08 h) | 0.811 (04 h) | 2266 (09 h) | 2251 (08 h) | 2273 (04 h) |
| Máximo | | | | | | |
| Promedio | 0.359 (00 h) | 0.432 (00 h) | 0.534 (11 h) | 2252 (00 h) | 2242 (00 h) | 2270 (11 h) |
| Mínimo | | | | | | |

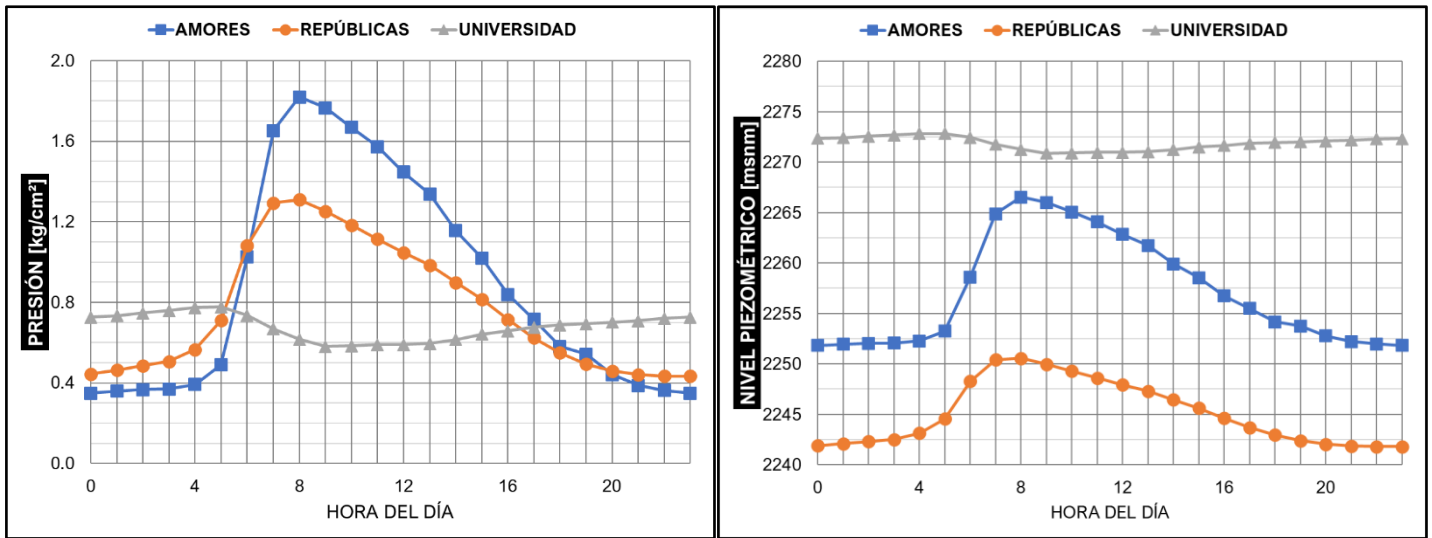


Gráfico 14a y 14b. Promedios horarios de presión y del nivel piezométrico por estación (Enero 2020 – Junio 2023)

Tabla 21. Promedios máximos y mínimos en cada estación del gráfico 14a y 14b

| | PRESIÓN [kg/cm²] | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | |
|------------------------|------------------|--------------|--------------|---------------------------|-------------|-------------|
| | Amores | Repúblicas | Universidad | Amores | Repúblicas | Universidad |
| Promedio Máximo | 1.819 (08 h) | 1.309 (08 h) | 0.776 (05 h) | 2267 (08 h) | 2251 (08 h) | 2273 (05 h) |
| Promedio Mínimo | 0.349 (00 h) | 0.434 (22 h) | 0.581 (09 h) | 2252 (00 h) | 2242 (22 h) | 2271 (09 h) |

Tabla 22. Desviación estándar de las presiones [kg/cm²] en cada estación por año, mes y hora

| AÑO | | | | | | | | |
|--------------------|-------|---------|------------|---------|-----------|-----------|-------|-------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | | | | |
| Amores | 0.610 | 0.573 | 0.674 | 0.627 | | | | |
| Repúblicas | 0.362 | 0.282 | 0.463 | 0.449 | | | | |
| Universidad | 0.335 | 0.261 | 0.316 | 0.145 | | | | |
| MES | | | | | | | | |
| | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | | |
| Amores | 0.612 | 0.571 | 0.504 | 0.618 | 0.617 | 0.717 | | |
| Repúblicas | 0.340 | 0.338 | 0.305 | 0.440 | 0.456 | 0.463 | | |
| Universidad | 0.268 | 0.221 | 0.185 | 0.261 | 0.297 | 0.348 | | |
| MES | | | | | | | | |
| | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | | |
| Amores | 0.632 | 0.543 | 0.708 | 0.630 | 0.654 | 0.663 | | |
| Repúblicas | 0.473 | 0.415 | 0.374 | 0.371 | 0.347 | 0.343 | | |
| Universidad | 0.298 | 0.259 | 0.433 | 0.432 | 0.492 | 0.340 | | |
| HORA | | | | | | | | |
| | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 |
| Amores | 0.082 | 0.089 | 0.099 | 0.101 | 0.143 | 0.243 | 0.495 | 0.528 |
| Repúblicas | 0.105 | 0.116 | 0.126 | 0.141 | 0.207 | 0.279 | 0.321 | 0.332 |
| Universidad | 0.337 | 0.351 | 0.375 | 0.379 | 0.380 | 0.378 | 0.356 | 0.346 |
| HORA | | | | | | | | |
| | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Amores | 0.456 | 0.424 | 0.403 | 0.406 | 0.439 | 0.456 | 0.491 | 0.501 |
| Repúblicas | 0.319 | 0.310 | 0.301 | 0.294 | 0.298 | 0.317 | 0.335 | 0.348 |
| Universidad | 0.339 | 0.312 | 0.308 | 0.314 | 0.314 | 0.306 | 0.274 | 0.268 |
| HORA | | | | | | | | |
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| Amores | 0.462 | 0.440 | 0.375 | 0.347 | 0.258 | 0.173 | 0.121 | 0.082 |
| Repúblicas | 0.319 | 0.280 | 0.229 | 0.184 | 0.143 | 0.118 | 0.104 | 0.103 |
| Universidad | 0.274 | 0.277 | 0.284 | 0.287 | 0.292 | 0.301 | 0.310 | 0.324 |

III. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Con los gráficos y las tablas generadas en la sección anterior, procedí a interpretar el comportamiento de los promedios de los registros. Durante esta fase, comparé los datos con los estándares definidos, identifiqué tendencias temporales, establecí relaciones entre la línea piezométrica y el perfil de elevaciones, y busqué conexiones entre las distintas estaciones de medición. Al comprender dicho comportamiento, pude realizar una evaluación integral del funcionamiento del sistema de abastecimiento de agua.

III.1. Comparación con estándares

La comparación de los promedios obtenidos de las gráficas y tablas de presión y nivel piezométrico en un sistema de abastecimiento de agua es crucial para evaluar el cumplimiento de los estándares establecidos por la legislación local. Además revela información significativa sobre el desempeño del sistema en diferentes intervalos de tiempo y estaciones.

De acuerdo al artículo 53 de la Ley del Derecho al Acceso, Disposición y Saneamiento del Agua que rige en la zona geográfica de interés (última reforma publicada en la Gaceta Oficial correspondiente al 29 de Octubre de 2020), el suministro de agua potable debe garantizarse con una presión mínima de 0.50 [kg/cm²].

La comparación de los promedios en las estaciones con este valor de presión mínima reveló lo siguiente:

Promedios Anuales: (Ver gráfico 10a)

- En la estación Universidad, el promedio de presión del año 2023 es el único promedio anual que está por debajo de la presión mínima requerida.
- Este hecho podría atribuirse a la ausencia de reportes mensuales para el segundo semestre del año 2023, los cuales probablemente habrían indicado un aumento en la presión durante esos meses. De lo contrario, una disminución constante podría sugerir problemas en la infraestructura, como fugas en la zona de la estación. Esta situación es inusual, ya que no se había observado en años anteriores.

Promedios Mensuales: (Ver gráfico 15)

- En las estaciones Amores y Repúblicas, se mantienen promedios mensuales que cumplen con la presión mínima durante todo el período de estudio.
- En la estación Universidad, los promedios que van desde julio de 2021 hasta abril de 2022, así como desde septiembre de 2022 hasta abril de 2023, junto con el promedio de junio de 2023, están por debajo de la presión mínima establecida.

Promedios Horarios: (Ver gráfico 16)

- En la estación Amores, se registran promedios horarios menores a la presión mínima en los intervalos de 0 horas a 4 horas y de 20 a 23 horas.
- En la estación Repúblicas, se registran promedios horarios menores a la presión mínima en los intervalos de 0 horas a 3 horas y de 19 a 23 horas.
- En la estación Universidad, todos los promedios horarios de la estación Universidad son mayores a la presión mínima.
- En general, es en la noche (entre las 19 horas y las 4 horas) cuando se presentan presiones por debajo de la presión mínima.

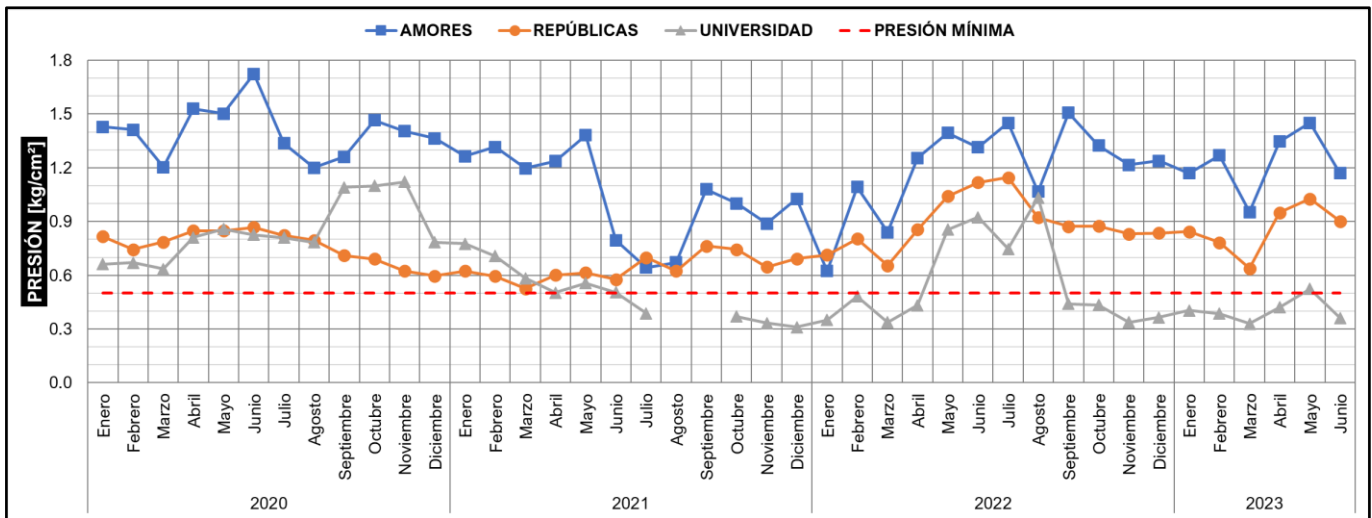


Gráfico 15. Promedios de presión de cada mes del periodo de estudio de cada estación (Enero 2020 – Junio 2023) comparados con la presión mínima requerida

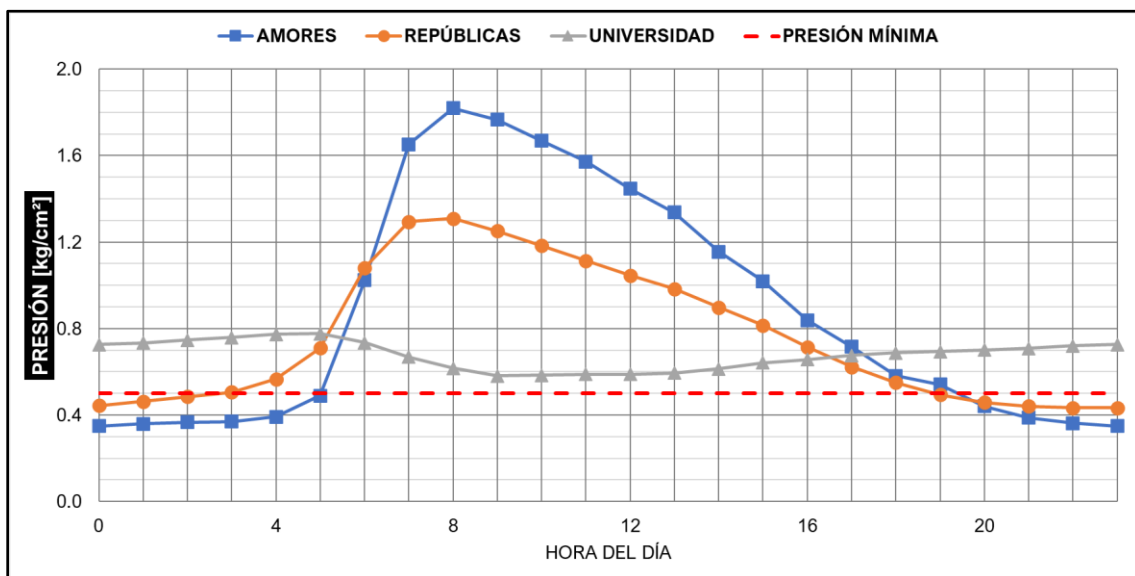


Gráfico 16. Promedios horarios de presión por estación (Enero 2020 – Julio 2023) comparados con la presión mínima requerida

En el caso de la presión máxima permisible en tuberías, me basé en una serie de recomendaciones dentro de las “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Ejecución de Obras e Instalaciones Hidráulicas” en la sección “2.3.5 Selección del material de la tubería”. Las recomendaciones las resumí en la tabla 23.

Tabla 23.Recomendaciones para la selección de la tubería de acuerdo con las presiones y al diámetro

| PRESIÓN | DIÁMETRO | MATERIAL DE LA TUBERÍA |
|--------------------------------|-------------------|---|
| Conducción de gastos pequeños | $D \leq 0.15$ [m] | PVC |
| $P < 14$ [kg/cm ²] | $D > 0.15$ [m] | Asbesto cemento |
| $P > 10$ [kg/cm ²] | $D > 0.60$ [m] | Asbesto cemento, Concreto presforzado o Acero |
| $P > 14$ [kg/cm ²] | | Acero o Concreto presforzado |

Consideré que las tuberías analizadas estaban fabricadas con asbesto cemento, ya que cumplen con el diámetro recomendado. Bajo esta consideración y la información de los diámetros de la tabla 12, el límite máximo de presión debería ser de 14 [kg/cm²]. Al realizar la comparación en el gráfico 17, observé que en ningún momento se sobrepasa este límite e identifiqué que la máxima presión registrada fue en la estación Amores, alcanzando un valor de 5.681 [kg/cm²].

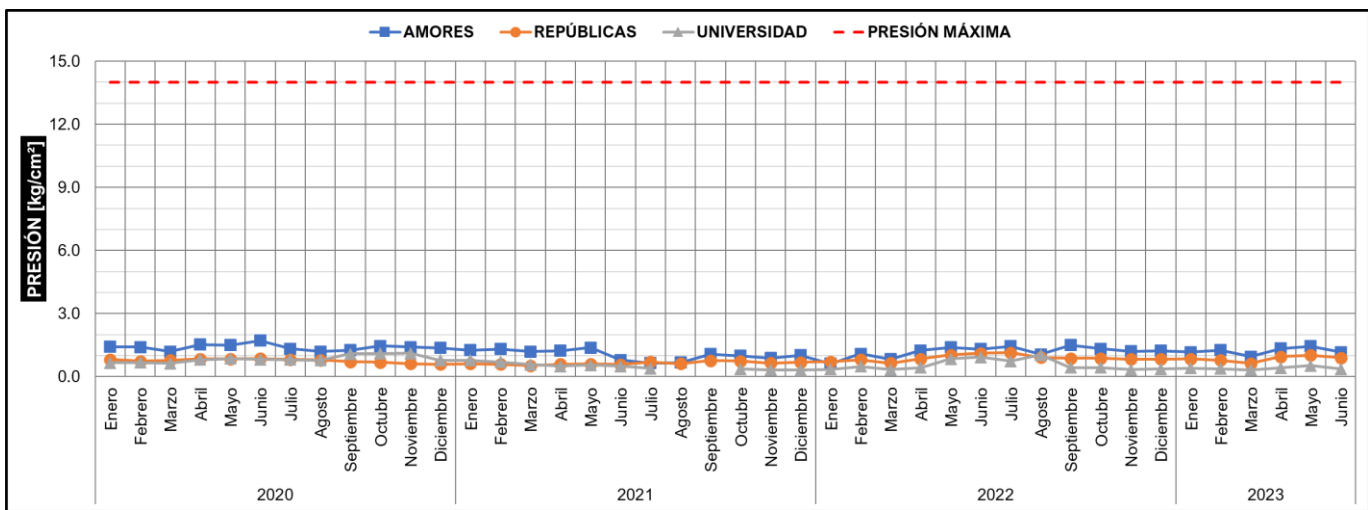


Gráfico 17.Promedios de presión de cada mes del período de estudio de cada estación (Enero 2020 – Junio 2023) comparados con la presión máxima recomendada

Respecto al nivel piezométrico, considerando que el sistema de distribución de agua de la ciudad funciona principalmente por gravedad, es importante que el nivel piezométrico de la estación de presión sea menor a la elevación del tanque de distribución correspondiente. La comparación realizada en los gráficos 18a, 18b y 18c mostró que, en ningún momento los promedios del nivel piezométrico mensual en las estaciones de presión supera la elevación del tanque de distribución asociado. Solo se evidencia una diferencia superior a 50 m entre estos dos valores en cada estación, aspecto que abordé con detalle posteriormente.

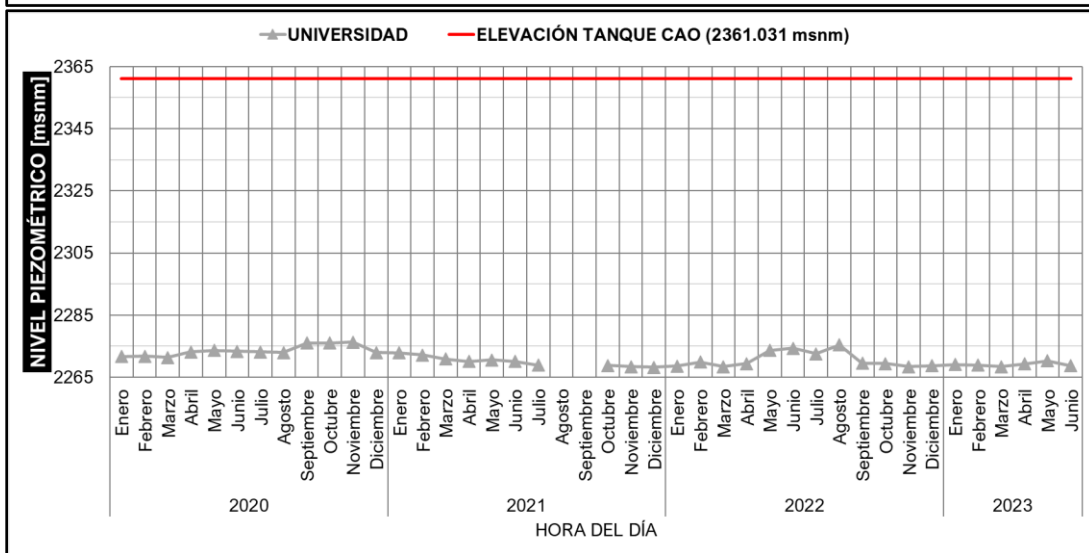
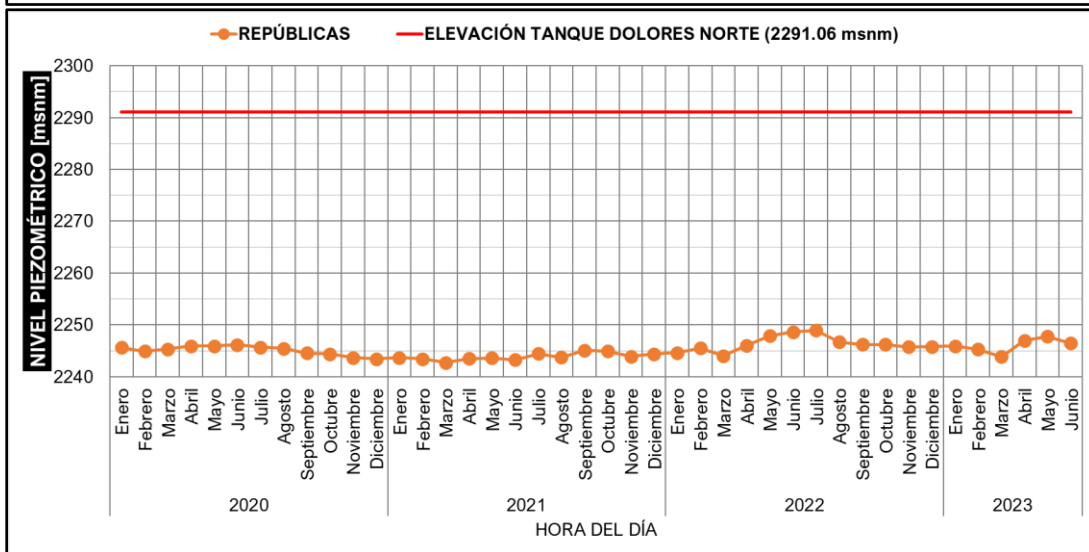
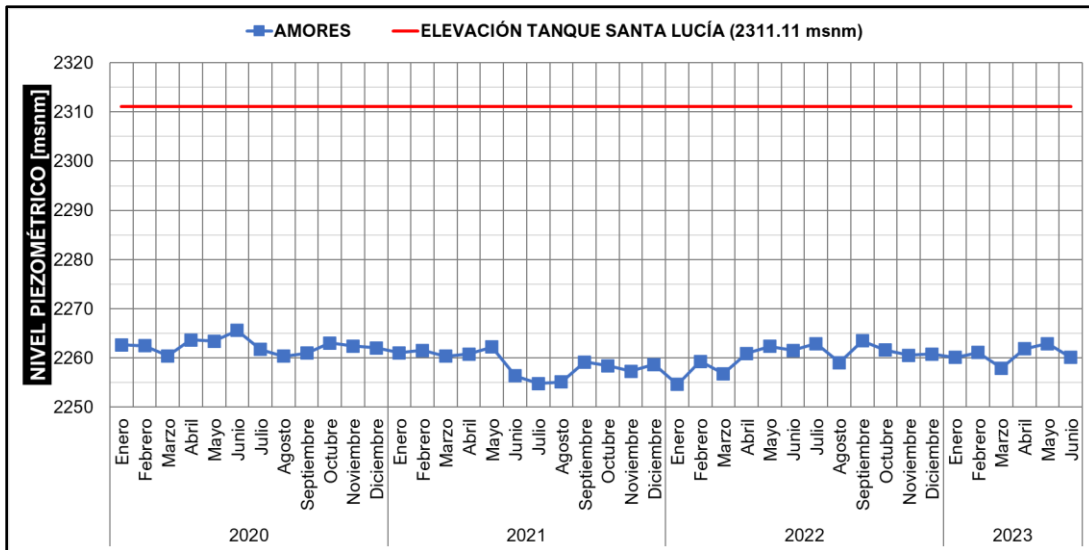


Gráfico 18a, 18b y 18c. Comparación de los promedios del nivel piezométrico de las estaciones con la elevación de su tanque de distribución correspondiente

III.2. Identificación de tendencias

Para comprender la evolución de la presión durante el período de estudio, realicé la identificación de tendencias que arrojó los siguientes resultados:

➤ *Variación Anual:* (Ver gráficos 9a y 10a)

Durante el año 2020, se registró el mayor promedio de presión, siendo este el año con las cifras más altas. Sin embargo, en el transcurso del 2021, se tiene una tendencia descendente en las presiones en todas las estaciones, lo que resultó en una disminución significativa en comparación con el año anterior. El 2021 se destacó por ser el año con las presiones más bajas en general.

En contraste, en el 2022, presenta una tendencia ascendente en todas las estaciones, al menos hasta el tercer trimestre del año. Lo que resultó en un aumento en el promedio de presión, convirtiéndose en el segundo más alto entre los años analizados.

Descartando cambios en la infraestructura del sistema de distribución de agua y cambios estacionales, las variaciones que observé sugieren que, en 2020, ocurrió un evento de gran magnitud que generó un incremento notable en los valores de presión registrados. Posteriormente, ya sea como respuesta a este evento o debido a otras circunstancias, las variaciones sugieren que se implementaron medidas de conservación del agua en 2021, lo que provocó una disminución notable en los niveles de presión. Mientras que las variaciones en 2022 y 2023, a falta de un análisis detallado de los gastos en esas estaciones, las podría interpretar como una regularización en la demanda de agua, ya que presentan un promedio de presión anual similar entre sí.

➤ *Variación Mensual:* (Ver gráficos 9b, 15, 19, 20, B-6 y B-7)

A nivel mensual, noté cierta similitud en los patrones de presión entre todas las estaciones el gráfico 19. Esto me motivó a analizarlas en conjunto, como se representa en el gráfico 20. Con estos gráficos y la tabla C-13 demuestro que se presentan consistentes disminuciones de presión en noviembre y marzo, siendo marzo el mes con la menor presión del año. Mientras que los aumentos de presión son habituales en abril y mayo, siendo mayo el mes con la presión promedio más alta del año. Esta variación resulta en presiones bajas desde noviembre hasta abril y presiones altas desde mayo hasta octubre.

La variación mensual en la presión está relacionada a las estaciones del año. Durante la temporada de otoño e invierno, en los meses de noviembre hasta abril, las presiones son más bajas debido a las condiciones climáticas más frescas y a una menor necesidad de riego. Por otro lado, durante la temporada de primavera y verano, desde mayo hasta octubre, las presiones son más altas debido a las temperaturas más cálidas y al aumento en el uso de agua para actividades como el riego de jardines y el llenado de piscinas.

Además, destaco que, la estación Amores tiende a tener las presiones más altas en comparación con las demás estaciones, mientras que la estación Universidad registra las presiones más bajas de todas.

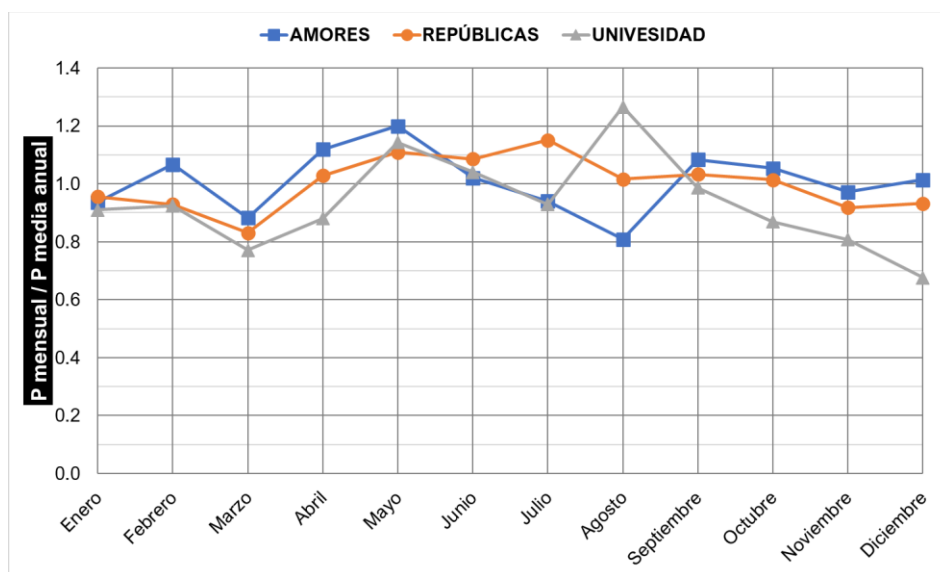


Gráfico 19. Promedio del cociente de la presión mensual entre la presión media anual correspondiente de cada estación

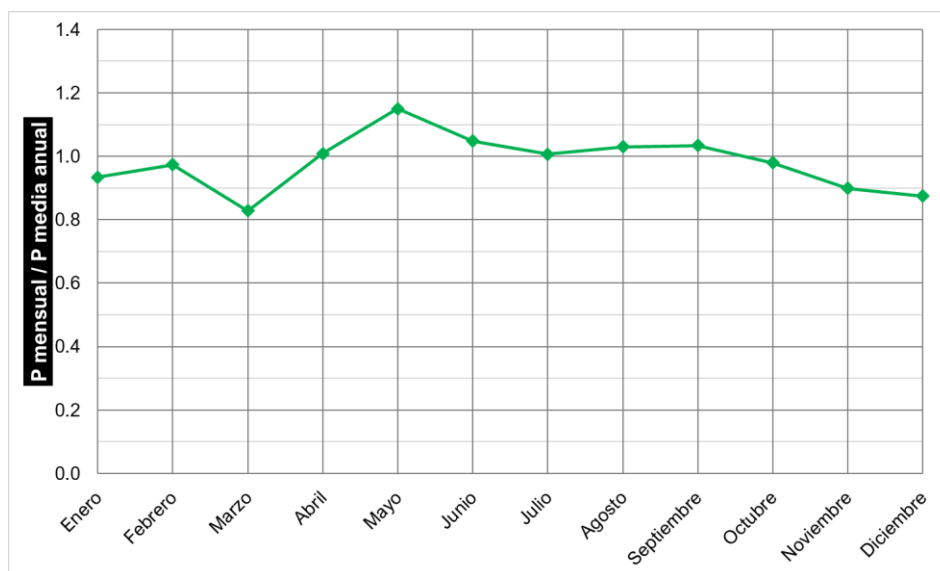


Gráfico 20. Promedio del cociente de la presión mensual entre la presión media anual correspondiente de las estaciones en conjunto

➤ **Variación Semanal:** (Ver gráfico 9c)

La variación semanal en las presiones se relaciona directamente con los días laborables. En concreto, las presiones más elevadas se encuentran los lunes y viernes, en contraste con el resto de los días de la semana, donde se presentan presiones ligeramente menores.

➤ *Variación Diaria:* (Ver gráfico 14a)

La variación diaria de la presión del agua parece estar vinculada al horario del inicio de las actividades diarias. Experimenta un aumento notable entre las 5 y las 8 de la mañana, coincidiendo con el inicio de las actividades diarias. Posteriormente, la presión inicia una disminución gradual que culmina en sus niveles más bajos entre las 21 horas y la medianoche, momento en el que las actividades domésticas llegan a su fin.

A excepción de la estación Universidad, que presenta un gráfico menos pronunciado, valores de presión similares y con un desplazamiento de tres horas hacia la izquierda, lo que convierte las 5 de la mañana en el momento con la presión más alta.

III.3. Relación de la línea piezométrica con el perfil de elevaciones

La comprensión de la relación entre la línea piezométrica y el perfil de elevaciones en un sistema de abastecimiento de agua es esencial para evaluar la eficiencia hidráulica y garantizar un suministro constante y equitativo. La línea piezométrica refleja la energía potencial del agua en diferentes puntos, mientras que el perfil de elevaciones revela cómo varía la elevación a lo largo de la red. Esta interacción proporciona información crítica sobre la distribución de presión, la velocidad del agua y la eficacia del sistema. Detectar desalineaciones permite identificar puntos críticos y optimizar la infraestructura para mantener un flujo constante y prevenir problemas hidráulicos.

En primera instancia, obtuve los valores promedios, máximos y mínimos de presión registrados en cada estación con el fin de generar las líneas piezométricas de cada valor (Tabla 24). Luego en un único gráfico, representé la elevación del tanque y de la estación, el perfil de elevaciones de la tubería asociada a la estación y las líneas piezométricas mencionadas.

Tabla 24. Valores promedios, máximos y mínimos de cada estación para generar las líneas piezométricas

| AMORES | | |
|--------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| | <i>PRESIÓN [kg/cm²]</i> | <i>NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm]</i> |
| Máximo | 5.681 | 2305.160 |
| Promedio | 1.195 | 2260.297 |
| Mínimo | 0.301 | 2251.357 |
| REPÚBLICAS | | |
| | <i>PRESIÓN [kg/cm²]</i> | <i>NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm]</i> |
| Máximo | 2.345 | 2260.910 |
| Promedio | 0.781 | 2245.269 |
| Mínimo | 0.311 | 2240.566 |
| UNIVERSIDAD | | |
| | <i>PRESIÓN [kg/cm²]</i> | <i>NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm]</i> |
| Máximo | 4.127 | 2306.357 |
| Promedio | 0.686 | 2271.954 |
| Mínimo | 0.286 | 2267.947 |

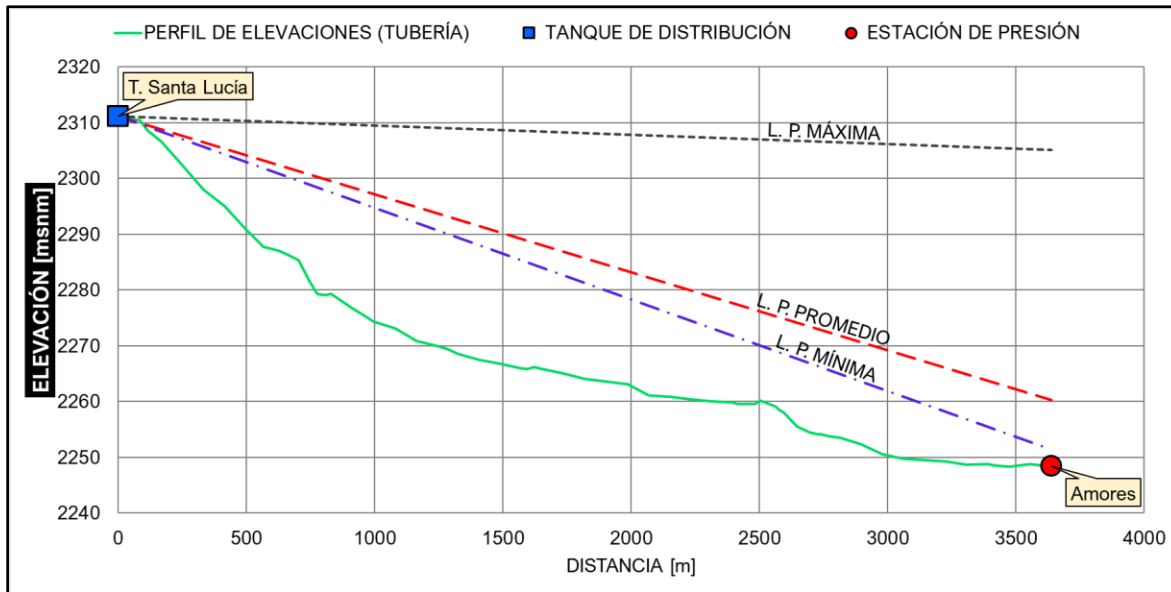


Gráfico 21. Líneas piezométricas del tanque Santa Lucía hasta la estación Amores

En el gráfico 21, ninguna de las líneas piezométricas desciende por debajo del perfil de elevaciones, por lo que no se presentan presiones negativas en la tubería de la estación Amores. Esto suele indicar un diseño adecuado del sistema y que la presión del agua es suficiente para abastecer a zonas elevadas sin problemas.

No obstante, en la línea piezométrica promedio y mínima se presentan entre 15 y 20 [m] de carga de presión (1.5 a 2.0 [kg/cm^2]), en el tramo de 750 a 3300 [m]. Estos valores superan la presión promedio en la estación, sugiriendo un funcionamiento con presión elevada en ese tramo. Si el diseño de la operación de la tubería fue adecuado, es probable que se haya instalado una válvula alrededor de los 750 [m] con el propósito de ajustar deliberadamente la línea piezométrica y reducir la presión desde ese punto hasta la estación.

La diferencia de elevaciones entre las líneas promedio y mínima con la línea máxima indica una variabilidad significativa en los registros de presión en la estación Amores, lo que sugiere la posibilidad de que el sistema controle y reduzca las pérdidas de carga, proporcionando así el servicio con presiones altas. Es decir que, se tiene una gestión controlada del sistema de abastecimiento de agua potable.

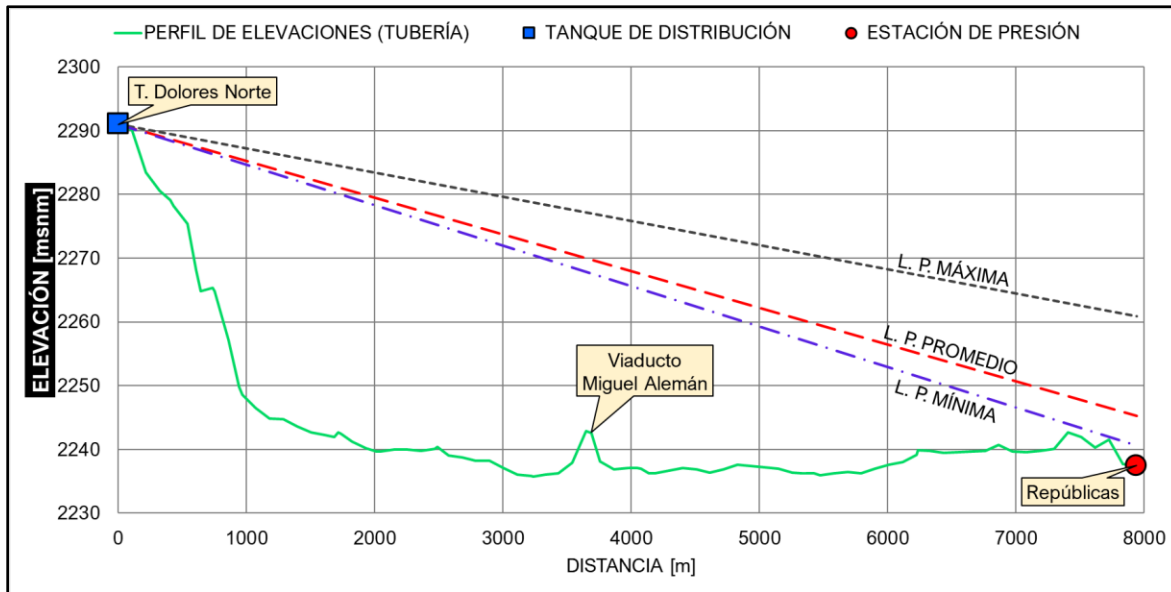


Gráfico 22. Líneas piezométricas del tanque Dolores Norte hasta la estación Repúblicas

Caso similar en el gráfico 22. No se registran presiones negativas pero la carga de presión supera los 10 [m] en la tubería desde el tramo 500 hasta 7000 [m], llegando incluso a estar hasta 38 [m] por encima del perfil de elevaciones, y en el caso de la máxima llega a 57 [m] por arriba. Esto indica que la presión en ese tramo es más alta en comparación con los promedios de la presión en la estación Repúblicas. La marcada diferencia de altura entre la tubería y la línea piezométrica podría aumentar el riesgo de daño en las tuberías debido a una presión excesiva o cambios bruscos en la presión del agua. Dada la longitud del tramo con estas características y el perfil de elevaciones de la tubería es posible que se hayan instalado válvulas a cada cierta distancia para regular la presión por secciones y que sea suficiente para todas las zonas a las que se les da servicio.

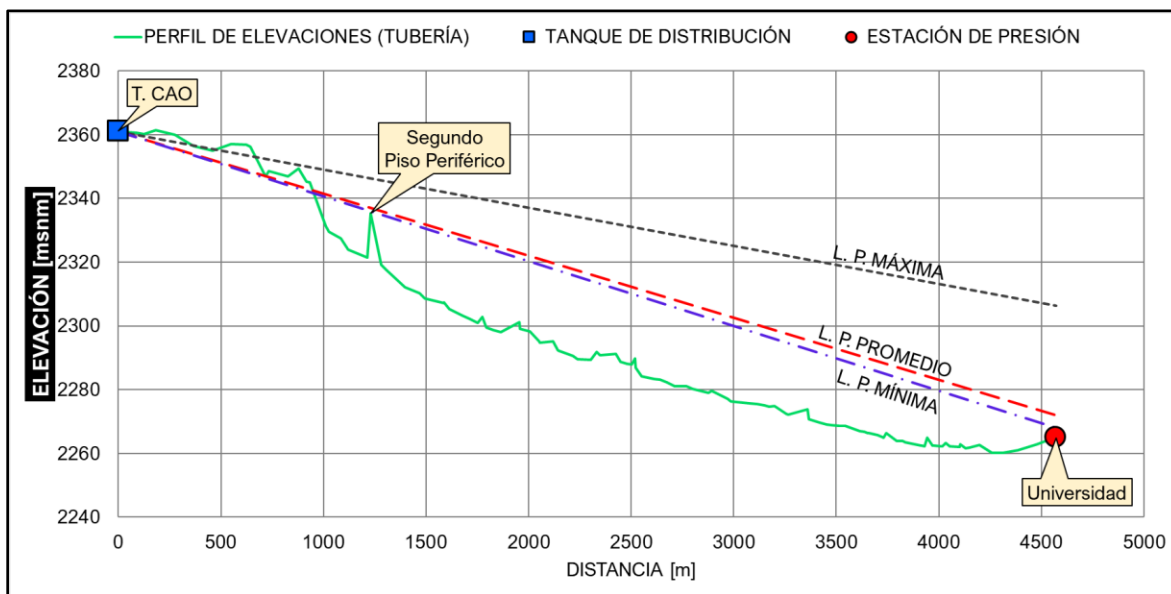


Gráfico 23. Líneas piezométricas del tanque CAO hasta la estación Universidad

Finalmente, en el gráfico 23, en los primeros 1000 [m] de la tubería, las líneas piezométricas pasan por debajo del perfil de elevaciones. Este fenómeno señala la existencia de presiones negativas en ese tramo, lo cual propiciaría la cavitación. En estas condiciones, tienden a acumularse bolsas de aire en puntos elevados, resultando en una reducción del caudal e incluso en la interrupción del flujo. En circunstancias más críticas, podría conducir a una implosión.

Dado que el proyecto está finalizado y la tubería está en funcionamiento, se sugiere que se realizaron modificaciones en el trazado de las tuberías y/o en la línea piezométrica. Como el perfil de elevaciones no representa fielmente el eje de conducción de la tubería y se basó en una suposición, es plausible que la elevación en esa sección de la tubería sea menor y/o que haya sido ajustada para estar por debajo de la línea piezométrica. Asumiendo que la tubería se encuentra 2 [m] abajo del perfil de elevaciones, aún se requeriría descender ese tramo entre 7 y 8 [m], lo que implica excavaciones de grandes volúmenes de material. Entonces cabe la posibilidad de que se haya modificado la línea piezométrica mediante la instalación de válvulas de aire, las cuales permiten la entrada controlada de aire y evitan la formación de presiones negativas.

Una característica relevante de estos tres gráficos es la pronunciada pendiente de las líneas piezométricas, evidenciando una marcada disminución entre el nivel piezométrico del tanque de distribución y la estación de presión. Para comprender mejor estas condiciones, opté por abordar primeramente el comportamiento de las cargas y pérdidas totales. Sin embargo, antes de calcularlas, determiné la velocidad del flujo en cada tubería. Para este cálculo, propuse un caudal que fuera coherente con las presiones promedio. La información del diámetro de la tubería proviene de la tabla 12. En la tabla 25 mostré los datos usados para calcular la velocidad.

Tabla 25. Cálculo de la velocidad en un tramo antes de cada estación.

| | GASTO PROPUESTO | DIÁMETRO | ÁREA | VELOCIDAD |
|--------------------|------------------------|-----------------|---------------------|------------------|
| | Q [m ³ /s] | D [m] | A [m ²] | V = Q/A [m/s] |
| AMORES | 1.2 | 0.914 | 0.657 | 1.827 |
| REPÚBLICAS | 1.0 | 1.219 | 1.167 | 0.857 |
| UNIVERSIDAD | 0.8 | 1.219 | 1.167 | 0.685 |

Aprovechando las velocidades calculadas, procedí a compararlas con los límites permisibles para tuberías de asbesto cemento, como se establecen en el *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado*. La velocidad mínima es de 0.3 [m/s], mientras que la velocidad máxima es de 5.0 [m/s] para tuberías de este material. Por el buen diseño del sistema, todas las tuberías analizadas cumplen con estos rangos de velocidad. Después calculé la carga de velocidad con la fórmula que presento en la tabla 24.

Continué calculando la carga total en las estaciones con la elevación de la estación (Tabla 13), los registros de presión (Tabla 24) y las velocidades (Tabla 25). A la elevación del

tanque le resté la carga total para finalmente obtener las pérdidas totales de carga, lo cual se encuentra detallado en la tabla 26.

Tabla 26. Cálculo de las pérdidas totales de carga en cada estación

| | ELEV. DEL TANQUE [msnm] | DE POSICIÓN | CARGA [m] | | | PÉRDIDAS DE CARGA [m] |
|-------------|----------------------------|-------------|--------------|--------------|----------|--------------------------|
| | | | DE VELOCIDAD | DE PRESIÓN | TOTAL | |
| AMORES | 2311.110 | 2248.352 | 0.170 | Máx: 56.808 | 2305.331 | 5.779 |
| | | | | Prom: 11.945 | 2260.467 | 50.643 |
| | | | | Mín: 3.005 | 2251.527 | 59.583 |
| REPÚBLICAS | 2291.060 | 2237.460 | 0.037 | Máx: 23.450 | 2260.947 | 30.113 |
| | | | | Prom: 7.809 | 2245.307 | 45.753 |
| | | | | Mín: 3.106 | 2240.603 | 50.457 |
| UNIVERSIDAD | 2361.031 | 2265.090 | 0.024 | Máx: 41.267 | 2306.381 | 54.650 |
| | | | | Prom: 6.864 | 2271.978 | 89.053 |
| | | | | Mín: 2.857 | 2267.971 | 93.060 |

Al comparar los valores de las variables que conforman la carga total, observé que la carga de velocidad era considerablemente pequeña en comparación con los otros elementos. Por esta razón, opté por despreciarla y centrarme exclusivamente en la carga de posición y en la carga de presión, que se refleja en el nivel piezométrico.

Tabla 27. Diferencia entre los niveles piezométricos del tanque y de la estación

| | ELEVACIÓN DEL TANQUE [msnm] | NIVEL PIEZOMÉTRICO EN LA ESTACIÓN | | PÉRDIDAS [m] |
|-------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------|-----------------|
| | | Máx: | Mín: | |
| AMORES | 2311.110 | Máx: 2305.160 | 5.950 | |
| | | Prom: 2260.297 | 50.813 | |
| | | Mín: 2251.357 | 59.753 | |
| REPÚBLICAS | 2291.060 | Máx: 2260.910 | 30.150 | |
| | | Prom: 2245.269 | 45.791 | |
| | | Mín: 2240.566 | 50.494 | |
| UNIVERSIDAD | 2361.031 | Máx: 2306.357 | 54.674 | |
| | | Prom: 2271.954 | 89.077 | |
| | | Mín: 2267.947 | 93.084 | |

En términos generales, las pérdidas en el sistema de tuberías se dividen en dos categorías: pérdidas por fricción del flujo y perturbaciones locales. En las pérdidas por fricción, basado en la fórmula de Darcy-Weisbach (tabla 4), intervienen variables como el factor de fricción (f), la longitud del conducto (L), el diámetro del conducto (D) y la velocidad media (V). Es relevante destacar que las tuberías de las estaciones Repúblicas y Universidad comparten el mismo diámetro, presentan presiones promedio y velocidades similares. La única diferencia significativa radica en la longitud de la tubería, siendo Repúblicas la de mayor extensión.

Si todas las variables relacionadas con las pérdidas por fricción son iguales, a excepción de la longitud, sería lógico esperar que la estación Repúblicas experimentara pérdidas superiores a las de la estación Universidad, dado que tiene una longitud de tubería mayor.

Sin embargo, esta expectativa no se reflejó en las pérdidas calculadas, según se muestra en la tabla 27. Este resultado sugiere que las pérdidas debido a la fricción son relativamente bajas en ambos casos, indicando que son las pérdidas locales las que tienen un impacto más grande en las pérdidas totales.

Como mencioné en el marco teórico, generalmente se pueden ignorar las pérdidas locales, excepto cuando la tubería tiene numerosos accesorios, momento en el cual estas pérdidas pueden ser significativas. Analizando las tuberías en estudio, observé que los ejes de conducción presentan pocos cambios de dirección, y no hay expansiones ni contracciones de diámetro. Este análisis lleva a la conclusión de que las pérdidas locales, en su mayoría, se deben a la presencia de accesorios como válvulas, situación que justifica las pérdidas. Esta observación se respalda con los datos de la estación Amores, donde se introdujeron pérdidas locales mediante válvulas aproximadamente a los 750 [m]. Esta medida se tomó para evitar presiones excesivas, resultando en una presión promedio registrada inferior a 1.2 [kg/cm²]. No obstante, cuando se necesitó una presión elevada en la estación, se realizaron ajustes con las válvulas, provocando una reducción en las pérdidas locales, al punto de que las pérdidas por fricción se volvieron predominantes.

III.4. Relación de valores entre estaciones

En el análisis de los promedios de presión a lo largo del año, mes y día, no encontré similitudes notables entre las estaciones de presión. Cada una muestra un perfil de presión único a lo largo del tiempo, indicando que factores específicos influyen en su comportamiento individual.

Sin embargo, al observar los promedios horarios (gráfico 14a), identifiqué ciertas semejanzas entre las estaciones Amores y Repúblicas. Estas dos estaciones presentan patrones de presión a lo largo del día que son consistentes y similares entre sí. En cambio, la estación Universidad muestra un comportamiento diferente a lo largo del día.

Cuando la presión alcanza su punto máximo en la estación Universidad, aproximadamente alrededor de las 5 de la mañana, las presiones en las estaciones Amores y Repúblicas comienzan a aumentar de manera significativa hasta las 8 de la mañana, precisamente cuando se registran las presiones más bajas en la estación Universidad. Y, cuando las presiones en las estaciones Amores y Repúblicas disminuyen, la presión en la estación Universidad empieza a aumentar, llegando a una convergencia de presiones cercanas a $0.7 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$ en todas las estaciones a las 17 horas del día. En pocas palabras, existe una relación inversa entre las presiones registradas en las estaciones Amores y Repúblicas en comparación con la estación Universidad: cuando las primeras dos aumentan, la otra disminuye, y viceversa.

Las estaciones Amores, Repúblicas y Universidad, están ubicadas muy cerca entre sí, y cada una de ellas está conectada a un tanque de distribución específico: Santa Lucía, Dolores Norte y CAO, respectivamente. Cada tanque se conecta a su estación correspondiente a través de tuberías individuales, y estas tuberías comparten un mismo espacio de distribución de agua. Por lo que, en la perspectiva hidráulica, esta situación se puede explicar con la operación conjunta de los tanques. Dando lugar a la evaluación no solo de la red de distribución, sino también del sistema de abastecimiento de agua potable.

La operación conjunta de estos tanques y tuberías permite regular el suministro de agua en dicha zona. Durante las horas de mayor presión, los tanques de Santa Lucía y Dolores Norte funcionan de manera convencional, mientras que el tanque CAO no opera al máximo rendimiento. En cambio, en las horas de menor demanda, el tanque CAO opera de manera normal, proporcionando una presión más alta, mientras que los tanques de Santa Lucía y Dolores Norte funcionan a menor capacidad. Este sistema de regulación contribuye a una gestión equitativa del suministro de agua a lo largo del día.

III.5. Evaluación del funcionamiento del sistema de abastecimiento

Las secciones anteriores me permitieron realizar una evaluación de la del sistema de abastecimiento de agua potable en estudio. La evaluación fue la siguiente:

➤ Cumplimiento de Presión Mínima

De acuerdo con la legislación vigente, el abastecimiento de agua potable debe asegurar una presión mínima de 0.50 [kg/cm²]. Sin embargo, de todos los promedios anuales, mensuales y horarios analizados, algunos de ellos no cumplen con este requisito. Por lo tanto, es recomendable tomar medidas que contribuyan a una presión consistente y que cumpla con los estándares legales en todas las estaciones de medición.

➤ Operación Conjunta de los Tanques de Distribución

Existe una relación inversa entre las presiones registradas en las estaciones de medición debido a la operación conjunta de sus tanques de distribución. Por las mañanas y la tarde, los tanques Santa Lucía y Dolores Norte funcionan con normalidad, mientras que el tanque CAO no opera al máximo. En la noche y en la madrugada, ocurre lo contrario. Esta regulación equitativa es un aspecto positivo de la gestión del sistema.

➤ Variabilidad en la Presión

Las variaciones en la presión a lo largo del tiempo se explican en su mayoría por factores como las estaciones del año, la semana laboral y el inicio y fin de las actividades diarias. No obstante, se presentan aumentos y disminuciones súbitas de la presión de un registro a otro, lo que sugiere la presencia de problemas en la red que podrían necesitar intervención o atención.

➤ Velocidad del Flujo

Las velocidades del flujo en las tuberías cumplen con los límites permisibles para tuberías de asbesto cemento, lo que indica un buen flujo en el sistema.

➤ Línea Piezométrica

La mayoría de la red mantuvo la línea piezométrica por encima del perfil de elevaciones, evitando presiones negativas en las tuberías. Esto sugiere un diseño adecuado del sistema de distribución y un suministro de agua suficiente para áreas elevadas. Aunque, hay algunos tramos con la línea piezométrica muy por arriba de la elevación de la tubería, lo que podría causar presiones excesivas y aumentar el riesgo de daño en las tuberías.

➤ Pérdidas de Carga

Las pérdidas totales de carga en la red son grandes. Las pérdidas debidas a la fricción son relativamente bajas, por lo que las pérdidas locales son las que contribuyen en gran medida a las pérdidas totales. Las pérdidas locales son principalmente debido a la

presencia de válvulas. Debe haber atención a la gestión de las válvulas y otros accesorios para reducir las pérdidas locales.

➤ Gestión controlada

Se resalta la importancia de una gestión controlada a través de la implementación estratégica de válvulas. Este aspecto clave se centra en la habilidad del sistema para ajustar con precisión las pérdidas locales y las presiones en diferentes secciones de la red. La gestión controlada, mediada por válvulas estratégicamente ubicadas, permite una respuesta ágil a las variaciones en la demanda, optimizando así el rendimiento y la eficiencia operativa del sistema.

La evaluación del sistema de abastecimiento de agua potable indica que funciona adecuadamente en lo que respecta a la presión. Se observan aspectos positivos, como la operación conjunta de los tanques de distribución y una velocidad del flujo que cumple con los rangos establecidos. No obstante, se presentan desafíos, como las pérdidas de carga y las fluctuaciones súbitas de presión que se resuelven mediante la gestión controlada a través de válvulas. La evaluación también sugiere implementar medidas para garantizar que en todas las estaciones se cumpla con la presión mínima requerida.

El sistema parece ser generalmente consistente y eficiente, pero es fundamental mantenerlo bajo supervisión constante mediante monitoreos de las estaciones y análisis de los registros de parámetros como la presión, la velocidad y el caudal. Este enfoque asegura que el sistema se mantenga en condiciones óptimas, garantizando así una entrega fiable de agua potable a los usuarios.

III.6. Aspectos que considerar de los resultados de la red de distribución

Para haber realizado una adecuada interpretación de los gráficos y de las tablas debí tener en cuenta diversos factores relacionados a la red de distribución que afectaba directamente a los resultados.

En primer lugar, las estaciones estudiadas registraron valores nulos de presión, teóricamente indicando una interrupción en la distribución de agua. Sin embargo, como se demostró previamente en la evaluación, la red opera adecuadamente con una distribución continua. Estos valores nulos simplemente indicaban que no se llevaron a cabo mediciones en esos momentos.

En segundo lugar, las estaciones también tienen un umbral mínimo de medición de carga de presión, lo que significa que no pueden medir con precisión cuando la presión cae por debajo de este umbral. En su lugar, registraron el valor del umbral. Estos dos factores no solo contribuyeron a la omisión de registros dispersos, sino que en combinación también ocasionaron la omisión de datos continuos, como fue el caso de la estación Universidad, donde omití los valores desde el 16 de julio hasta el 30 de octubre de 2021. Todo esto afectó directamente a ciertos promedios de presión obtenidos.

A pesar de estas limitaciones, los registros de los reportes mensuales proporcionados por las estaciones fueron suficientes para analizar el comportamiento de la presión e identificar tendencias en distintas unidades de tiempo dentro del periodo correspondiente a los reportes. Esta información permitió realizar una evaluación adecuada del sistema de abastecimiento, proporcionando datos valiosos para la implementación de medidas que contribuyen a la eficiencia y confiabilidad del sistema de distribución de agua potable.

En perspectiva futura, en beneficio del sistema, es necesario considerar el acceso a tecnologías emergentes. Si se producen avances en la tecnología de medición de presión en las redes de distribución de agua, se podrían aprovechar estas innovaciones para mejorar la precisión de investigaciones similares. Además, es crucial estar atentos a las posibles modificaciones en las regulaciones gubernamentales y los estándares de calidad del agua, que podrían cambiar con el tiempo. Estos cambios podrían requerir ajustes continuos en el sistema de distribución de agua potable para cumplir con los nuevos requisitos.

IV. COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN DURANTE EVENTOS SIGNIFICATIVOS

En esta sección, llevé a cabo un análisis detallado del comportamiento de las presiones en la red de distribución de agua potable en dos eventos significativos. Uno de estos eventos corresponde a la pandemia de COVID-19, un suceso global que impactó diversos aspectos de la sociedad, incluyendo la salud pública, la economía, y la educación. Elegí este evento debido a los cambios generados en el comportamiento de la población, como el confinamiento y el distanciamiento social, que podrían influir en la demanda y el uso de servicios públicos, como el suministro de agua potable.

El segundo evento que examiné fue la inauguración del centro comercial y de torres de departamentos, oficinas y consultorios del centro urbano llamado “Mítikah”, ubicado en la zona de estudio. Esta apertura tuvo implicaciones demográficas, económicas y sociales en la comunidad local, lo que resultó en un aumento de demanda de servicios locales, incluyendo el suministro de agua.

Comparar las condiciones de presión antes y después de estos dos eventos es fundamental para comprender la posible influencia de eventos externos y cambios en la infraestructura en el funcionamiento del sistema de abastecimiento de agua potable.

IV.1. Pandemia de COVID-19

La pandemia de COVID-19, causada por el virus SARS-CoV-2, comenzó a fines de 2019 en la ciudad de Wuhan, China, y se convirtió en una crisis global de salud. Se propagó rápidamente a múltiples países, generando infecciones y muertes en todo el mundo. Para frenar la propagación y mitigar los efectos, se implementaron medidas de salud pública sin precedentes, como el confinamiento, el distanciamiento social y el uso generalizado de mascarillas. Además de los impactos en la salud, la pandemia tuvo efectos significativos en la economía, la educación y la vida cotidiana de las personas en todo el mundo.

Debido a la prolongada duración de la pandemia de COVID-19, resultó complicado seleccionar un único período representativo para la comparación. Por ello, elegí las tres fases epidemiológicas establecidas por el gobierno de México. Las fechas de cada fase se pueden observar en la tabla 28.

Tabla 28. Período de las fases epidemiológicas establecidas en México durante la pandemia COVID-19

| FASES EPIDEMIOLÓGICAS EN MÉXICO | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | FASE 1 | FASE 2 | FASE 3 |
| | <i>Importación del Virus</i> | <i>Dispersión Comunitaria</i> | <i>Contagio Epidémico</i> |
| FECHA | 28/FEB/2020 al 23/MAR/2020 | 24/MAR/2020 al 20/ABR/2020 | 21/ABR/2020 al 01/MAY/2022 |

- *Fase 1 (Importación del Virus)*

Durante esta fase inicial, se registraron casos de infección adquiridos en el extranjero, sin evidencia de contagio local. El número de infectados con el virus era bajo, y las medidas sanitarias no eran tan estrictas, solo centradas en la prevención de la propagación del virus.

- *Fase 2 (Dispersión Comunitaria)*

En esta fase, se observó la transmisión local de la enfermedad entre personas sin conexión con casos extranjeros. El número de casos confirmados creció rápidamente. Se tomaron medidas más rigurosas, como la suspensión de clases, el trabajo a distancia, la cancelación de eventos masivos, la suspensión de actividades en lugares cerrados y la activación del Plan DN-III-E de la Secretaría de la Defensa Nacional de México. Se recomendó a la población, especialmente a los grupos vulnerables, permanecer en sus hogares.

- *Fase 3 (Contagio Epidémico)*

En esta fase, se aplicaron protocolos sanitarios más rigurosos, como la cuarentena generalizada en todo el país. Las medidas preventivas se mantuvieron, incluyendo el distanciamiento social, la difusión constante de información sobre mitigación y síntomas, así como la suspensión indefinida de actividades no esenciales y eventos en caso de

brotes. Los brotes se volvieron regionales y la enfermedad se propagó a nivel nacional, con un aumento significativo en el número de casos.

Teniendo la fecha de inicio y final de estas tres fases, decidí limitar la primera comparación a un período desde enero 2020 (un mes antes del inicio de la fase 1) hasta junio 2020 (dos meses después del inicio de la fase 3). Para realizar la comparación, utilicé las presiones de todas las estaciones en conjunto, dado que la pandemia tuvo un impacto generalizado en lugar de afectar únicamente una zona específica.

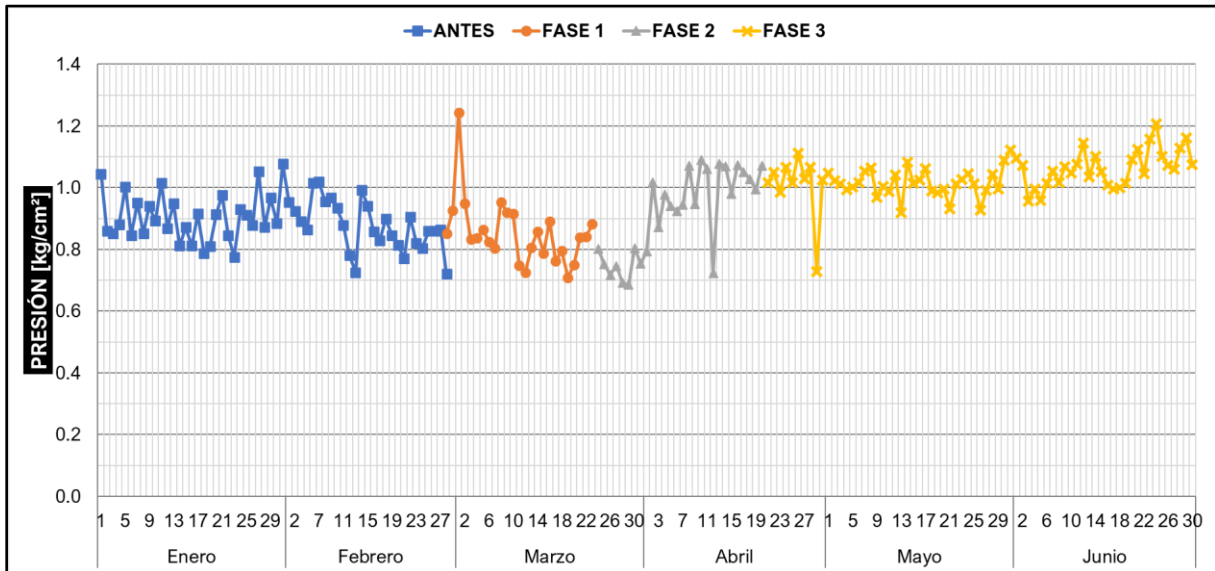


Gráfico 24. Promedio de presión diario de las estaciones en conjunto que abarca el antes y después del inicio de las fases epidemiológicas en México (Enero 2020 – Junio 2020)

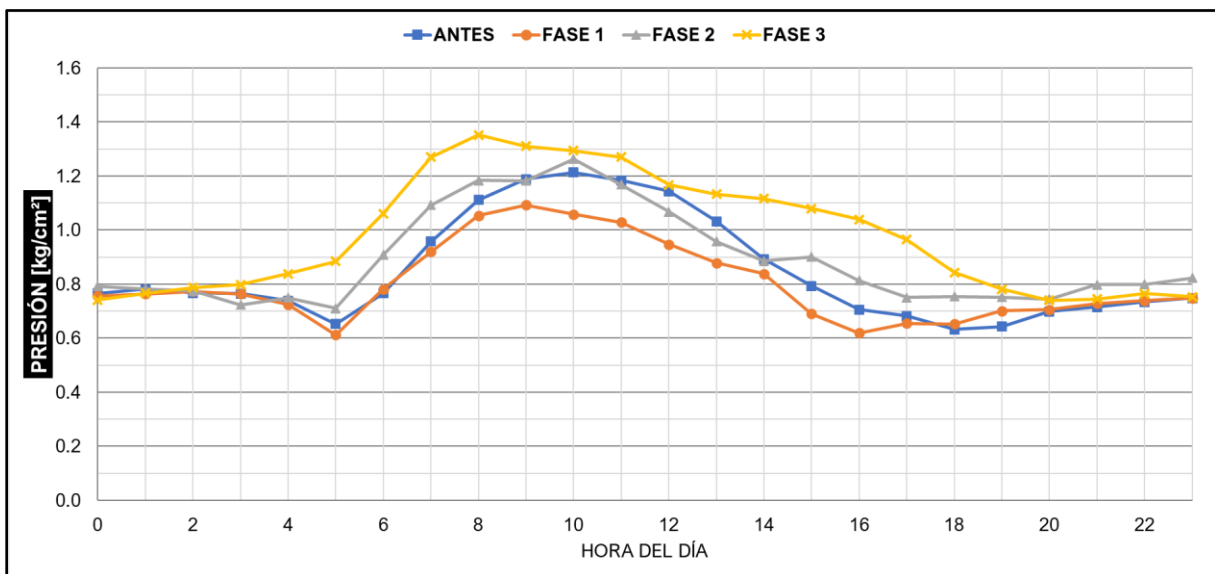


Gráfico 25. Promedio de presión horario de las estaciones en conjunto que abarca el antes y después del inicio de las fases epidemiológicas en México (Enero 2020 – Mayo 2020)

Del gráfico 24, pude identificar que antes del inicio de las fases epidemiológicas en México, específicamente en los meses de enero y febrero, el promedio diario de la presión se mantenía en un rango de 0.8 a 1.0 [kg/cm²]. Sin embargo, se presenta un cambio en los primeros tres días del inicio de la fase 1, cuando el promedio experimentó un aumento, llegando a 1.2 [kg/cm²]. Este aumento inicial podría ser atribuible a la reacción inmediata de la población ante la noticia de los primeros casos de infección adquiridos en el extranjero. Es probable que, al enterarse de estos casos, las personas hayan aumentado su consumo de agua debido a una mayor conciencia de la importancia de la higiene y la prevención de enfermedades.

No obstante, a medida que la fase 1 continuó y la situación se fue normalizando, observé una disminución en el promedio diario de la presión. Entonces, es posible que las personas hayan vuelto a sus patrones de consumo de agua anteriores, al no notar la gran problemática de la pandemia hasta ese momento.

Durante la fase 2, el gráfico muestra un aumento considerable de la presión, donde el promedio se incrementó de 0.7 a valores de entre 1.0 y 1.1 [kg/cm²]. Estas cifras superan las presiones observadas antes del inicio de las fases epidemiológicas. Este aumento de la presión posiblemente es consecuencia de las restricciones y las recomendaciones de distanciamiento social que estuvieron en vigor durante esta fase. Con las personas pasando más tiempo en sus hogares, se llevaron a cabo diversas actividades, que van desde prácticas de higiene más rigurosas, como lavarse las manos con mayor frecuencia, hasta realizar tareas como cocinar y llevar a cabo el aseo del hogar. Como resultado, se requería de una mayor presión para satisfacer adecuadamente todas estas actividades en los hogares.

En la fase 3, los promedios diarios de la presión son ligeramente superiores a los observados en la fase 2, no hubo aumentos ni disminuciones importantes comparándolas con las que hubo en las anteriores fases. Una plausible explicación es que, a pesar de la cuarentena generalizada y las medidas más estrictas, las personas se adaptaron a la nueva realidad impuesta por la pandemia. Durante la fase 3, la conciencia sobre la importancia de la higiene y las prácticas de prevención de enfermedades se consolidó en la población.

Por lo tanto, es razonable que las personas hayan mantenido hábitos de higiene más rigurosos y por lo tanto se necesitaba de una mayor presión, pero a un nivel más constante y predecible en comparación con la fase 2, donde las medidas sanitarias se implementaron por primera vez y generaron variaciones más abruptas en la presión.

El gráfico 25 refleja un resumen de lo explicado anteriormente. En la fase 1, se observan los menores promedios horarios de todas las fases, ya que las personas aún no comprendían la gravedad de la pandemia. Sin embargo, a medida que se implementaron medidas sanitarias más estrictas en la fase 2, las presiones horarias comenzaron a

aumentar. Finalmente, en la fase 3, con la cuarentena generalizada, se registraron las presiones más altas de todas las fases.

Después, realicé una comparación general, utilizando únicamente como punto de referencia el 28 de febrero de 2020, que marca el inicio de las fases epidemiológicas en México. En los gráficos, incorporé los promedios correspondientes a un mes antes, seis meses después, un año después y dos años después de esta fecha.

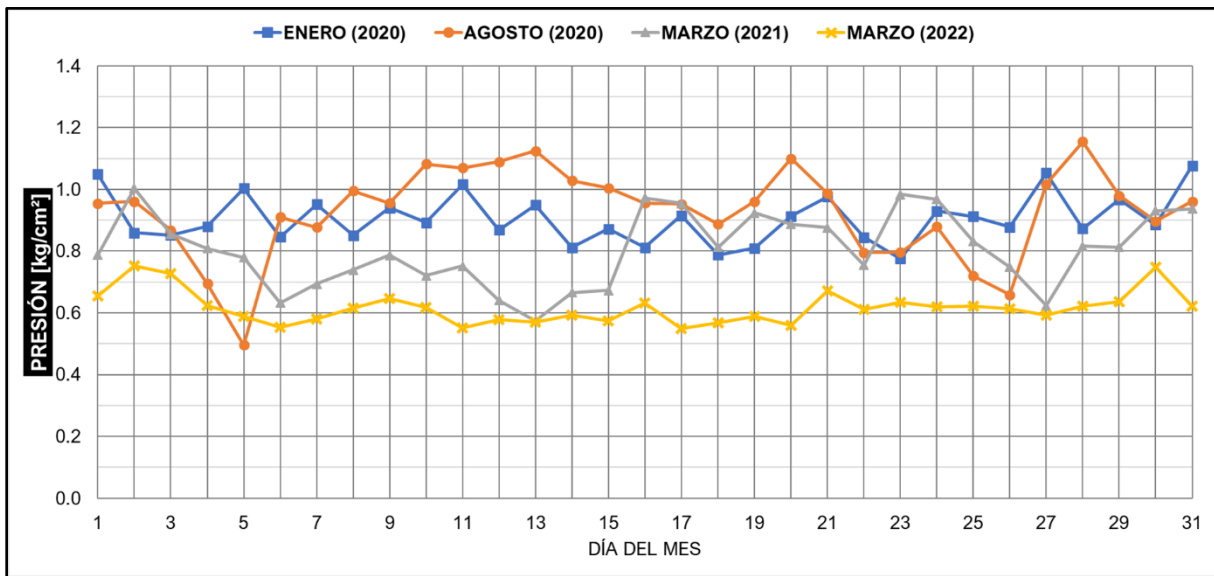


Gráfico 26. Promedio diario de presión de las estaciones en conjunto durante en distintos meses de la pandemia COVID-19

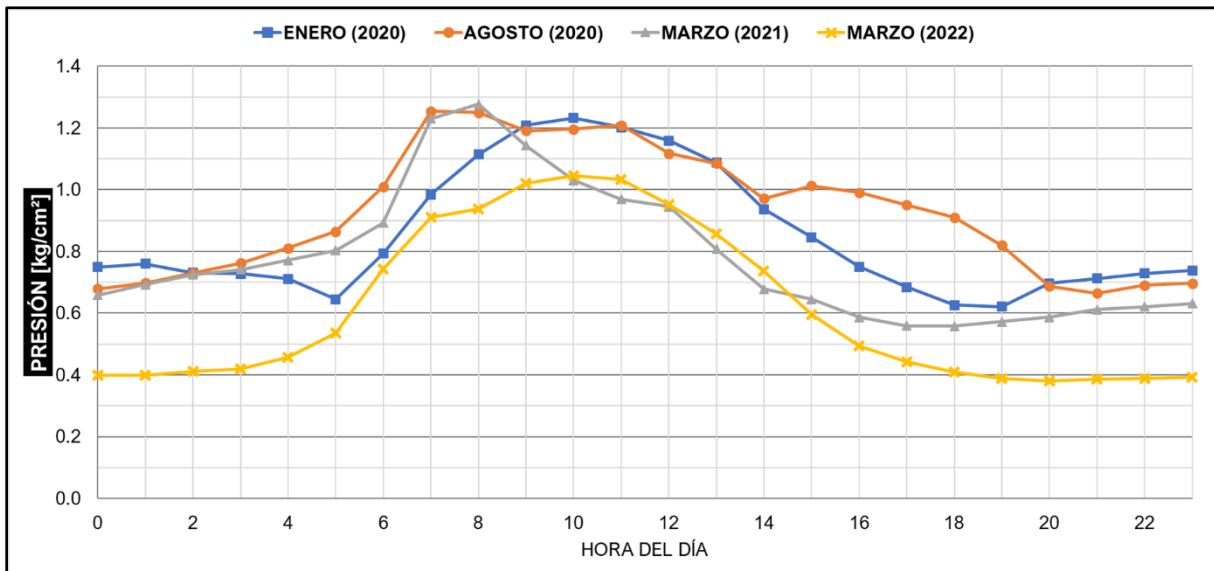


Gráfico 27. Promedio horario de presión de las estaciones en conjunto en distintos meses de la pandemia COVID-19

Lo que parece estar sucediendo en los gráficos 26 y 27, es que las presiones fueron influenciadas por la pandemia incluso seis meses después de que comenzaron las fases

epidemiológicas. En agosto de 2020, las presiones diarias y horarias alcanzan sus valores máximos, lo que podría deberse a la persistencia de las medidas sanitarias y la adaptación continua de las personas a la situación. A medida que se avanza hacia marzo de 2021, las presiones comienzan a disminuir y a parecerse más a las observadas antes del inicio de la pandemia. Esto podría indicar una cierta estabilización de la situación y una adaptación de las personas a la nueva normalidad, lo que reduce la presión del agua dentro de las tuberías en comparación con los picos observados durante la pandemia.

IV.2. Centro urbano “Mítikah”

El centro urbano “Mítikah” es un complejo de usos mixtos, ubicado cerca de las estaciones de presión, que incluye una torre residencial de 23 niveles (operativa desde 2012), un hospital de 11 niveles (operativo desde 2013), otra torre residencial de 65 niveles con 640 departamentos, una torre de oficinas de 35 niveles, una torre de consultorios que consta de 10 niveles y un centro comercial de 5 pisos con 280 locales. Estas tres últimas torres y el centro comercial fueron inaugurados el 23 de septiembre de 2022. También, el proyecto contempla la construcción de otras dos torres y un centro de oficinas que aún no se han iniciado.

Primero procedí a obtener la distancia entre "Mítikah" y cada estación con el fin de analizar si su proximidad generó un efecto directo en el comportamiento de las respectivas presiones. Además, esto más adelante me permitió determinar a cuál red de tuberías estaba conectado "Mítikah", ya sea a la red asociada a la estación Amores, Repúblicas o Universidad. Utilizando el software QGIS creé un polígono que abarcara el área ocupada por “Mítikah” en una imagen satelital. Posteriormente, ubiqué un punto en el centro del polígono para representar la ubicación exacta de “Mítikah”. La proximidad a cada estación la obtuve de los atributos de las líneas rectas trazadas desde “Mítikah” hasta cada estación. Los resultados los detallé en la tabla 29 y los presenté en la ilustración 14.

Tabla 29. Distancia entre el centro urbano “Mítikah” y cada una de las estaciones de presión

| | ESTACIÓN | | |
|--|----------|------------|-------------|
| | AMORES | REPÚBLICAS | UNIVERSIDAD |
| | 771 [m] | 1492 [m] | 1816 [m] |

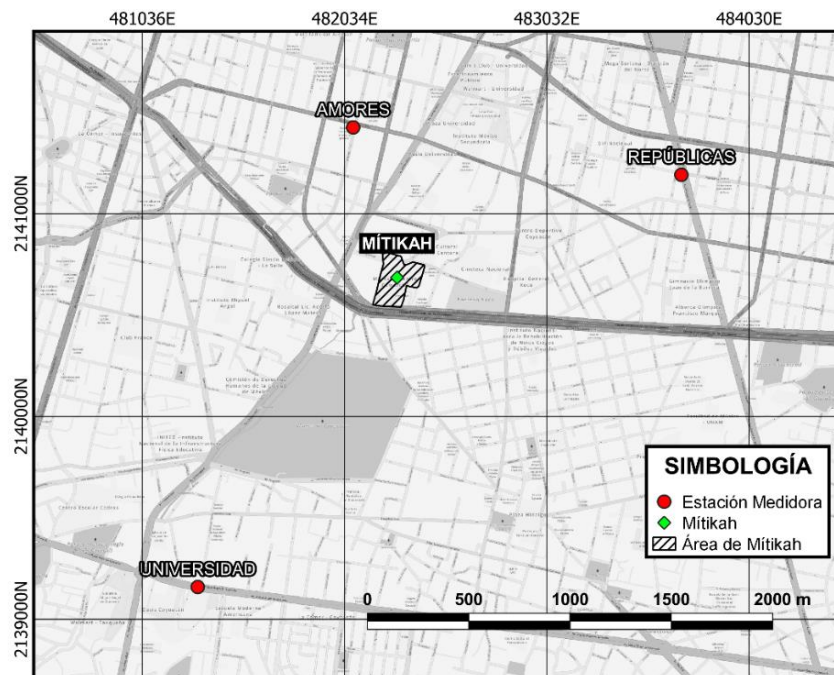


Ilustración 14. Mapa de la ubicación de las estaciones, así como del centro urbano “Mítikah”

El período de comparación del comportamiento de las presiones lo restringí a un mes antes y un mes después del 23 de septiembre de 2022, fecha de la inauguración de las tres torres y del centro comercial. Además, esta comparación la llevé a cabo por estación, considerando que algunas estaciones de presión se encuentran más cerca de "Mítikah" que otras, lo que puede influir de manera diferente en los registros de cada una.

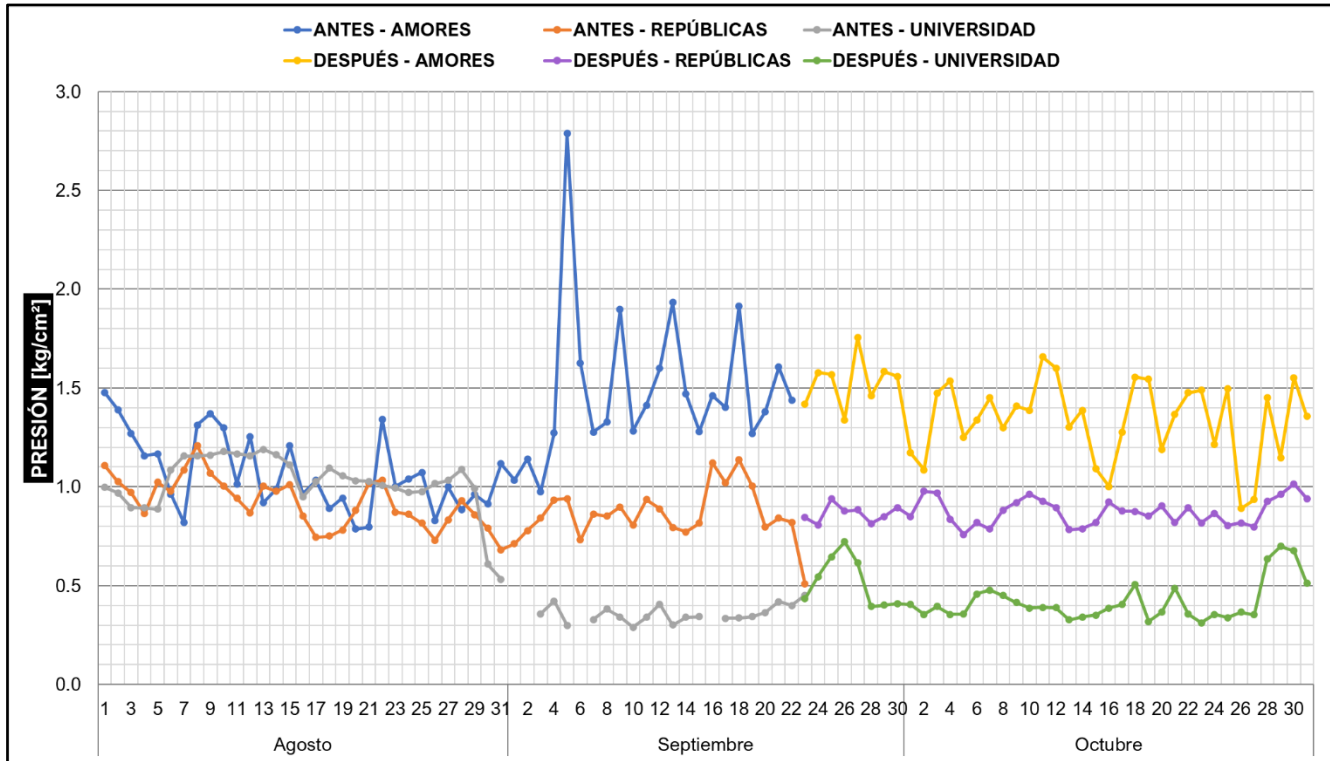


Gráfico 28. Promedio diario de presión por estación un mes antes y un mes después de la inauguración del centro comercial y de las tres torres de "Mítikah"

Basándome en el gráfico 28, la estación Repúblicas no muestra variaciones significativas en las presiones, sugiriendo que el centro urbano "Mítikah" no está conectado a la tubería asociada a Repúblicas.

Por otro lado, en Amores, hay un aumento puntual en la presión que se mantuvo constante desde tres semanas antes de la inauguración hasta incluso un mes después de la inauguración. Pero en Universidad, la presión disminuyó justamente cuatro semanas antes de la inauguración, llegando a valores tan bajos como 0.3 [kg/cm²], por debajo de la presión mínima requerida, y esta disminución se mantuvo en los registros posteriores.

Estas fluctuaciones podrían estar relacionadas con actividades vinculadas a la construcción, pruebas o preparativos para el evento en sí. La relación inversa entre las presiones en estas dos estaciones podría atribuirse a la gestión en conjunto de sus tanques de distribución (como ya lo mencioné en la evaluación del sistema) y al enfoque en satisfacer necesidades locales, ya que ambas estaciones están cerca entre sí.

V. CONCLUSIONES

En el contexto de la gestión del agua en México, donde la escasez se ha vuelto una preocupación creciente, la distribución eficiente del recurso es de vital importancia, especialmente en el sector de abastecimiento público. En esta área, la red de distribución desempeña un papel crucial para garantizar un suministro constante y confiable de agua potable a áreas urbanas.

En la investigación, el enfoque se centró en un análisis de los registros de presión debido a que conté con los reportes mensuales (con información horaria) generados por las estaciones de presión de Amores, Repúblicas y Universidad. Este análisis ofrece información esencial para explicar la operación del sistema de abastecimiento y de la red de distribución, para identificar posibles problemas, para asegurar la calidad y seguridad del suministro de agua potable, y para contribuir a la gestión sostenible de este recurso cada vez más escaso. La evaluación del sistema de abastecimiento, basada en el análisis, no solo permite la detección de probables inconvenientes, sino también el desarrollo de soluciones inmediatas, incluso en situaciones de emergencia, para garantizar que el suministro de agua a la población se mantenga ininterrumpido.

Uno de los aspectos cruciales a considerar al analizar los registros de presión es la variabilidad que se presenta a lo largo del tiempo. Estas variaciones están influenciadas por diversos factores, como las estaciones del año, la semana laboral y el inicio y fin de las actividades diarias. A nivel mensual, se observa una clara relación estacional en la presión del agua. Durante los meses de noviembre a abril, esta disminuye, influenciada por las condiciones más frías. En contraste, en los meses de mayo a octubre, caracterizados por temperaturas más elevadas y actividades como el riego de jardines y el llenado de piscinas, la presión tiende a aumentar. A nivel semanal, las presiones son más altas al comienzo y final de la semana laboral, mientras que, a un nivel diario, los registros tienen aumentos notables en la presión durante las horas de la mañana, coincidiendo con el inicio de las actividades diarias, seguido de una disminución gradual hacia la noche, cuando las actividades de las personas comienzan a concluir. Estos patrones reflejan cómo la presión del agua responde a las necesidades y comportamiento del consumo de los usuarios.

Observándolo de esta manera, la variación de la presión en la red de distribución podría estar directamente relacionada con los patrones de demanda de agua a lo largo del tiempo, dejándose como una futura línea de trabajo el analizar los gastos. Lo cual, indicaría que la capacidad de respuesta de esta red analizada satisface eficazmente las necesidades de agua de los usuarios.

Otro aspecto considerado en la tesis fueron las líneas piezométricas. Generé líneas piezométricas con la elevación del tanque y el nivel piezométrico previamente calculado, lo que me permitió establecer conexiones con el perfil de elevaciones de las tuberías y a

su vez, entender su funcionamiento. Cuando la línea piezométrica desciende por debajo del eje de conducción, se crean presiones negativas, lo que obstaculiza la distribución eficiente del agua en esa área. Por otro lado, si la línea piezométrica está significativamente por encima de la tubería, indica una presión excesiva, lo que a menudo requiere la instalación de accesorios como válvulas para controlar el flujo y reducir la presión, mitigando así el riesgo de daño en las tuberías.

La presencia de esta última situación la identifiqué en gran parte de la tubería de cada estación, revelando presiones considerablemente superiores a los promedios registrados en las estaciones. Considerando que el proyecto está en funcionamiento, supuse que la instalación de válvulas fue realizada para inducir pérdidas y modificar la línea piezométrica. Esta idea también se basa en la marcada pendiente de estas líneas, indicando una disminución grande entre el nivel piezométrico del tanque de distribución y la estación de presión.

Para respaldar esta observación, realicé el análisis de las pérdidas y la revisión de las propiedades y geometría de las tuberías asociadas a cada estación. Como resultado, se determinó que las pérdidas por fricción eran bajas y que las pérdidas locales predominaban en las pérdidas totales. Además de ello, estas pérdidas locales no se originaban a partir de cambios de dirección ni de diámetro, sino debido a la estratégica instalación de válvulas en el sistema.

La interpretación de los resultados me permitió realizar la evaluación del funcionamiento del sistema al que pertenecen los registros utilizados en esta tesis. Durante algunas horas el sistema de abastecimiento de agua potable funciona de manera aceptable y satisfactoria. Aunque existen desafíos en términos de pérdidas de carga y fluctuaciones de presión que se resuelven mediante la gestión controlada a través de válvulas, en su mayoría opera de manera eficiente. Es esencial mantener un monitoreo continuo e implementar medidas para contribuir a un suministro confiable y de calidad a los usuarios.

Realicé una compilación de los valores de presión a partir de los reportes mensuales, creando campos adecuados para su análisis futuro. Además, llevé a cabo un ajuste para obtener una consistencia en los datos, aplicando criterios específicos. Esto fue esencial, ya que como lo demostré, si hubiera trabajado con los datos originales sin depuración, los promedios de presión habrían sido considerablemente más bajos. Por tal razón, se estableció una metodología, con procedimientos que me permitieran definir los datos que analizaría e interpretaría posteriormente.

Aunque este trabajo fue posible gracias a los registros horarios generados por las estaciones de presión, es relevante mencionar que herramientas como las hojas de cálculo de Excel y el SIG desempeñaron un papel fundamental para desarrollar de manera adecuada la investigación. Utilizando las hojas de cálculo, pude consolidar el conjunto de datos en un único archivo, realizar los cálculos necesarios con variables referenciadas y procesar la información de manera eficiente. Por otro lado, el SIG desempeñó un papel

crucial al complementar el análisis de las presiones, sirviendo como base para obtener información clave sobre variables que intervienen en las ecuaciones de la hidráulica.

El uso de un SIG en la tesis contribuyó a que yo lograra incorporar información geográfica y topográfica, como ubicaciones, datos de elevación, perfiles y planos. Para emplear esta herramienta es necesario utilizar conceptos cartográficos y geográficos, así como habilidades técnicas en la captura y gestión de datos geoespaciales, incluyendo el uso de bases de datos geográficas. Conocimientos en proyección cartográfica, transformaciones de coordenadas y técnicas de análisis espacial que son esenciales, así como, capacidad de interpretar y comunicar los resultados de manera explícita.

En este caso opté por usar el software QGIS ya que estoy familiarizado con la interfaz y funciones básicas, pero principalmente por la facilidad con la que puedo generar mapas de alta calidad. Con este SIG cree un modelo digital de elevaciones en el que georreferencié las estaciones de presión y sus respectivos tanques de distribución. Esto me permitió obtener datos precisos sobre las elevaciones, que posteriormente utilicé para calcular los niveles de presión considerando tanto la elevación como la carga de presión. Adicionalmente, generé perfiles de elevación para las tuberías de cada estación, creando capas que representaban la vista en planta de dichas tuberías, aprovechando las herramientas que brindaba QGIS, que tiene la característica de ser un software de uso libre.

Estas herramientas mencionadas, además de desempeñar un papel fundamental en la elaboración de esta tesis, han constituido una contribución significativa a mi desarrollo académico. La integración de cursos especializados, no limitados exclusivamente a Excel y SIG, sino también abarcando diversos softwares de modelado, ya sea en modalidad intersemestral o como parte del plan de estudios de ingeniería civil, habría facilitado considerablemente la comprensión y aplicación de ciertos temas en disciplinas como hidráulica, estructuras y geotecnia, entre otras.

En el análisis descriptivo, empleé la herramienta "Gráficos y Tablas Dinámicas" de Excel, fundamental para el manejo de los 64,783 registros de presión recopilados. Estas gráficas y tablas ofrecen una variedad amplia de estadísticos descriptivos, centrándome particularmente en la tesis en el análisis del promedio y la desviación estándar. Además, me permitieron explorar y extraer de manera eficiente información clave al personalizar la presentación de los datos según mis necesidades, seleccionando los campos relevantes. En general, esta herramienta es altamente versátil, adecuada para trabajar con grandes conjuntos de datos y personalizar la presentación de la información de acuerdo con las necesidades del usuario.

En cuanto a las conclusiones relacionadas con los eventos significativos. En la pandemia COVID-19, las fases epidemiológicas influyeron en el comportamiento de la presión. En la Fase 1, hay un aumento inicial en la presión debido a la reacción inmediata de la población ante los primeros casos de infección extranjeros. Sin embargo, a medida que

la Fase 1 continuó y la situación se normalizó, se presenta una disminución en el promedio diario de la presión, ya que las personas volvieron a realizar las actividades con normalidad.

Durante la Fase 2, la presión aumenta considerablemente debido a las restricciones y el distanciamiento social. En la Fase 3, los promedios diarios aumentaron en menor proporción a los de la Fase 2 y no hubo variaciones grandes con respecto a las fases anteriores. Esto ocurrió porque, a pesar de las medidas más estrictas, las personas se adaptaron a la nueva realidad impuesta por la pandemia, manteniendo hábitos de higiene más rigurosos y por ende se seguía requiriendo de una alta presión, haciendo que las mínimas aumentaran en comparación con las fases anteriores.

Respecto al centro urbano "Mítikah" y la inauguración de su centro comercial junto con tres torres de departamentos, oficinas y consultorios, rescato lo siguiente. La estación Repúblicas no brinda servicio a "Mítikah", ya que no presenta variaciones significativas en las presiones. En cambio, hay un aumento de presión en la estación Amores y una disminución en la estación Universidad, semanas antes de la inauguración del complejo mencionado. La relación inversa entre las presiones en estas dos estaciones sugiere una colaboración en la gestión de sus tanques de distribución. En otras palabras, cuando la presión disminuyó en Universidad, se aumentó la presión en Amores para abastecer la zona.

Por lo tanto, ¿La presión del agua, de alguna manera, es un reflejo de los acontecimientos en la superficie? Sí, el comportamiento de la presión muestra el suceso de eventos, como la crisis global de salud y un evento local de carácter urbano. ¿Es un indicador silencioso de nuestra vida cotidiana y el impacto de la ingeniería civil en nuestro entorno? Sí, pude establecer relaciones entre los aumentos y disminuciones de la presión con la semana laboral y las actividades cotidianas domésticas. También durante pandemia, revela el comportamiento de las personas, desde la reacción inmediata y la falta de importancia dada al COVID-19 en la Fase 1, hasta el aumento de la preocupación y la implementación de medidas durante la Fase 2, y finalmente, el distanciamiento social y la normalización en la Fase 3. Además, la presión indica cómo "Mítikah" suministra agua a todo el complejo y cómo el sistema se adaptó a la falta de presión. Por último, ofrece información sobre la ingeniería llevada a cabo, el funcionamiento hidráulico, el estado de la red de distribución de agua potable y la representación del sistema que permita mediante su evaluación, la toma de decisiones.

A pesar de que este trabajo se centró en los registros de presión, no limitó la exploración de otras variables esenciales, como el nivel piezométrico, la velocidad, las cargas totales y las pérdidas de carga. Estas variables proporcionaron la base para desarrollar una metodología sólida, llevar a cabo un análisis exhaustivo e interpretar los resultados de manera adecuada. El marco analítico sirve como punto de partida para investigaciones futuras relacionadas con el sistema de abastecimiento de agua potable. Entre las posibles líneas de investigación se encuentran: establecer coeficientes de variación para la presión

a diferentes horas o durante distintas temporadas, optimización de la presión en la red para minimizar las pérdidas de energía, desarrollo de modelos hidráulicos específicos para estimar la demanda con variables como velocidad y gasto, entre otras.

BIBLIOGRAFÍAS

Álvarez Fernández, V. (2012) *Proyecto de Mejora de la Red de Abastecimiento/Ejecución Acometida*. Villanueva y Geltrú, España.

Ávila, A. & Luna, P. (s.f.). *Proyectos de abastecimiento de agua potable con enfoque de género para Zonas Rurales* [Diapositivas de PowerPoint]. Bolivia: Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Barrera Paredes, J. A. (s.f.). Cap. 3 Dinámica de fluidos. En *Apuntes de mecánica de Fluidos* (pp. 58-80). Sonora, México: Universidad de Sonora.

Bon Santoyo, H. (2017). *Flujo no permanente en redes de distribución de agua potable*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/91060>

Cadavid Restrepo, J. H. (2018). *Hidráulica de Tuberías*. Antioquia, Colombia: Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT.

Camacho, H. & Casados, J. (2017). *Regulación de los servicios de agua potable y saneamiento en México*. Jiutepec, Mor: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Capital 21 Web. (2021, 27 febrero). 'Línea de tiempo COVID-19'; a un año del primer caso en México. *Capital 21 Web*. Recuperado de: <https://www.capital21.cdmx.gob.mx/noticias/?p=12574>

CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México, edición 2018*. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable*. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado*. México: Comisión Nacional del Agua.

Datoz. (2022, 26 mayo). *¿Cómo va el avance de Mítikah de Fibra Uno?*. Datoz. Recuperado de: <https://www.datoz.com/como-va-el-avance-de-mitikah-de-fibra-uno/>

Devore, J. L. (2008). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias (7ª ed.)*. México: International Thomson.

Donoso Moya, D. (2022, 13 julio). *Mítikah, el complejo inmobiliario mexicano que pelea ser uno de los más grandes de la región*. *DF SUD*. Recuperado de:

<https://dfsud.com/america/mitikah-el-complejo-inmobiliario-mexicano-que-pelea-ser-uno-de-los-mas>

Durán, J. & Torres, A. (2006). *Los problemas del abastecimiento de agua potable en una ciudad media*. *Espiral, Estudios sobre Estado y Sociedad*, XII (36), 129-162.

El Economista. (2019, 9 mayo). *¿Cuál es la historia de Mitikah, su construcción y permisos?*. *El Economista*. Recuperado de: <https://www.economista.com.mx/politica/Cual-es-la-historia-de-Mitikah-su-construccion-y-permisos-20190509-0037.html>

Facultad de Ingeniería Ciencias Químicas Región Xalapa. (2015). *Manual de Detección de Pérdidas de Agua*. Xalapa, Ver: Universidad Veracruzana.

Fuentes, O., Palma, A. & Rodríguez, K. (2011). *Estimación y localización de fugas en una red de tuberías de agua potable usando algoritmos genéticos*. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XII (2), 235-242.

Gaceta UNAM. (2021, 18 marzo). *México experimenta escasez de agua y falta de equidad en su distribución*. Gaceta UNAM. <https://www.gaceta.unam.mx/mexico-experimenta-escasez-de-agua-y-falta-de-equidad-en-su-distribucion/>

Gálvez Villanueva, H. E. (2008). *Análisis de la línea de carga total en un sistema de conducción por gravedad y por bombeo*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gambacica, J., Castillo, B., González, H., Cruz, P. & Figueredo, J. (2014). *Líneas Piezométricas y Líneas de Energía*. Colombia: Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

García, J., Pérez, J. & Urrea, M. (2011). Cap. 20 Control y mantenimiento de las redes de distribución. En *Abastecimiento de aguas*. Cartagena, España: Universidad Politécnica de Cartagena.

González Alvarado, R. (2020, 13 febrero). *Tomas de agua ilegales, problema añejo y difícil de identificar: experto*. *La Jornada*. Recuperado de <https://www.jornada.com.mx/2020/02/13/capital/030n1cap>

González Iguualada, R. (2007). *Hidráulica básica*. Madrid, España: Máster en Ingeniería y Gestión del Agua

Guevara Garzón, E. J. (2005). *Tiempo mínimo de respuestas en redes de distribución de agua potable con el fin de establecer los requisitos del control del tiempo real*. (Tesis de

Maestría). Universidad de los Andes, Colombia. Recuperado de https://repositorio.uniandes.edu.co/static/pdf/aceptacion_uso_es.pdf

Infobae. (2022, 24 septiembre). *Mítikah: el complejo comercial que costó 22 mil 500 mdp, 14 años y provocó protestas en su inauguración*. Infobae. Recuperado de: <https://www.infobae.com/america/mexico/2022/09/24/mitikah-el-complejo-comercial-que-costo-22-mil-500-mdp-14-anos-y-provoco-protestas-en-su-inauguracion/>

INSP. (2020, 22 abril). *Fases de la epidemia por COVID-19*. México: Instituto Nacional de Salud Pública, Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.insp.mx/avisos/5344-fases-de-la-epidemia-por-covid-19.html>

Jiménez Terán, J. M. (2013). *Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado*. Xalapa, Ver: Universidad Veracruzana.

Ley del Derecho al Acceso, Disposición y Saneamiento del Agua de la Ciudad de México. (2023). Capítulo II Del Servicio de Agua Potable, Artículo 53.

Martín, I., Salcedo, R. & Font, R. (2012). *Mecánica de fluidos: Tema 1. Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles*. España: Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Alicante. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10045/20299>

Martínez, M. A. (2022, 12 julio). *La red hidráulica de la CDMX, vieja y obsoleta; gastan millones en repararla. La Silla Rota*. Recuperado de <https://lasillarota.com/metropoli/2022/7/12/la-red-hidraulica-de-la-cdmx-vieja-obsoleta-gastan-millones-en-repararla-384054.html>

Méndez, V. (2013). *Mítikah Office Tower: entrevista con Richard Meier & Partners acerca de su nuevo proyecto en México*. Revista Código. Recuperado de: <https://web.archive.org/web/20131111045231/http://www.revistacodigo.com/mitikah-office-tower-entrevista-con-richard-meier-partners-acerca-de-su-nuevo-proyecto-en-mexico/>

Microsoft Support (s.f.) *Datos dinámicos en una tabla dinámica o gráfico dinámico*. Recuperado de: <https://support.microsoft.com/es-es/office/datos-din%C3%A1micos-en-una-tabla-din%C3%A1mica-o-gr%C3%A1fico-din%C3%A1mico-b8592a65-87ee-44ec-a5c4-56c052206ab1>

MÍTIKAH. (s. f.). *MÍTIKAH | Componentes*. <https://mitikah.com.mx/componentes.html>

Obras por Expansión. (2019, 15 marzo). *La fase 2 de Mítikah puede construirse si reduce densificación, dice Sheinbaum*. Obras por Expansión. Recuperado de: <https://obras.expansion.mx/inmobiliario/2019/03/15/la-fase-2-de-mitikah-puede-construirse-si-reduce-densificacion-dice-sheinbaum>

Paz Rueda, V. M. (2014). *Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU*. (Tesis de licenciatura). Universidad Carlos III de Madrid, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10016/24892>

Santiago, D. (2023, 25 mayo). *Huachicoleo de agua: Sacmex detecta 124 tomas clandestinas en casi seis años*. *Expansión Política*. Recuperado de: <https://politica.expansion.mx/cdmx/2023/05/25/huachicoleo-de-agua-sacmex-detecta-124-tomas-clandestinas-en-casi-seis-anos>

SECITI & Gobierno de la Ciudad de México. (2016). *La Ciudad de México en el siglo XXI: Realidades y retos*. Ciudad de México, México: Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación junto con el Gobierno de la Ciudad de México.

Secretaría de Salud. (2020, 21 abril). 110. *Inicia la fase 3 por COVID-19*. México: Secretaría de Salud, Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/salud/prensa/110-inicia-la-fase-3-por-covid-19?idiom=es>

Secretaría de Salud. (2020, 31 marzo). 098. *Medidas de seguridad sanitaria*. México: Secretaría de Salud, Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/salud/prensa/098-medidas-de-seguridad-sanitaria?idiom=es>

SEDUVI. (2019, 14 marzo). *Comunicado sobre proyecto inmobiliario Mítikah*. México: Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la CDMX. Recuperado de: <https://www.seduvi.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/comunicado-sobre-proyecto-inmobiliario-mitikah>

SIAPA. (2014). Cap. 2.5 Redes de Distribución. En *Actualización de los criterios y lineamientos técnicos para factibilidades en la Z.M.G* (pp. 36-47). México: Sistema Intermunicipal de los servicios de Agua Potable y Alcantarillado.

Suárez, V., Quezada, M., Oros, S., & Ronquillo, E. (2020). *Epidemiología de COVID-19 en México: del 27 de febrero al 30 de abril de 2020*. *Revista Clínica Española*, 220(8), 463-471. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.rce.2020.05.007>

Toledo Valencia, C. (2001). *Unidad de fluidos*. Santiago de Chile, Chile: Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile.

Tzatchkov, V., Alcocer, V., Bourguett, V., & Arreguín, F. (2014). *Avances en la hidráulica de redes de distribución de agua potable*. Jiutepec, Mor: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

ANEXO A

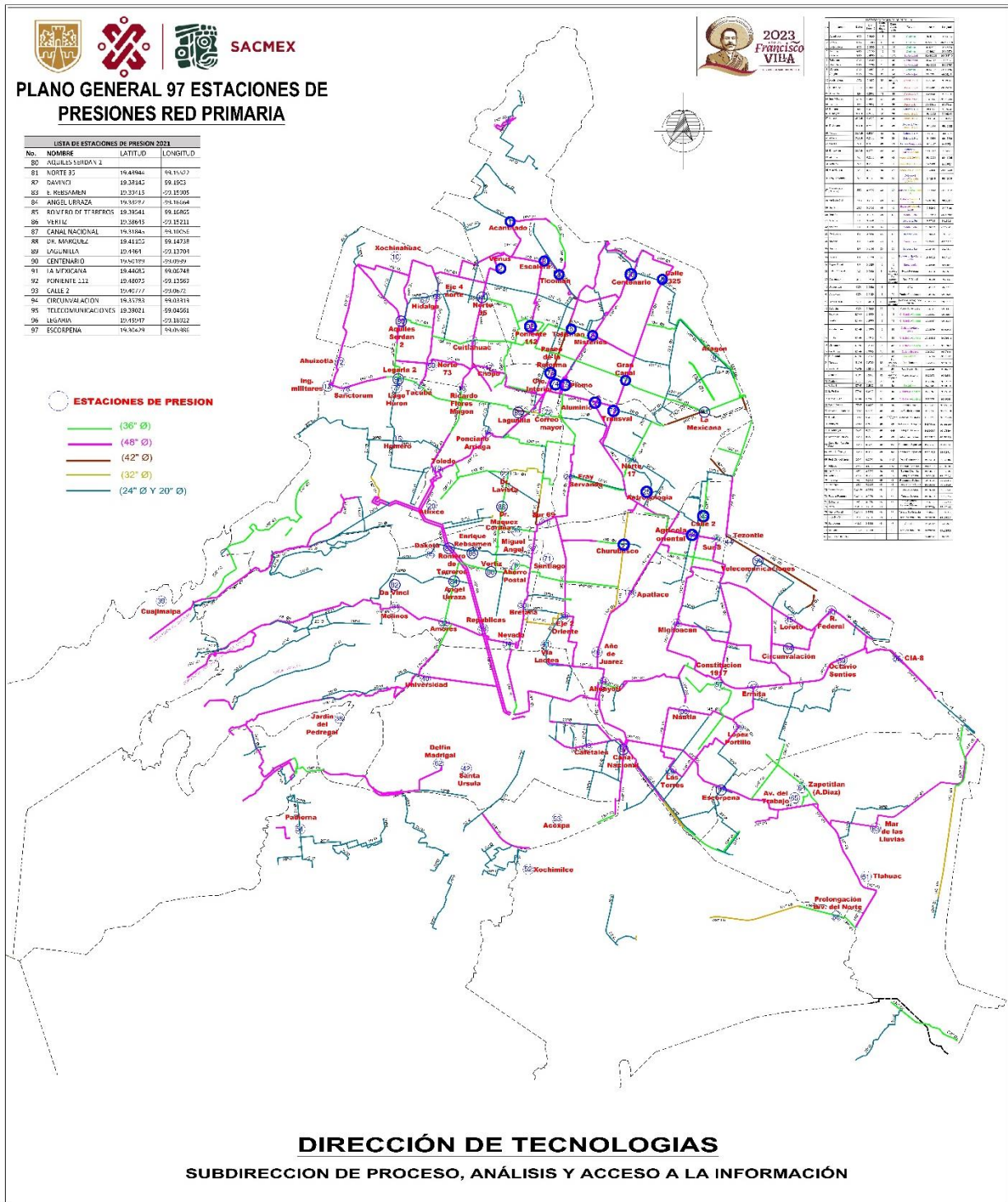


Ilustración A-1.Plano General 97 Estaciones de Presiones Red Primaria

ANEXO B

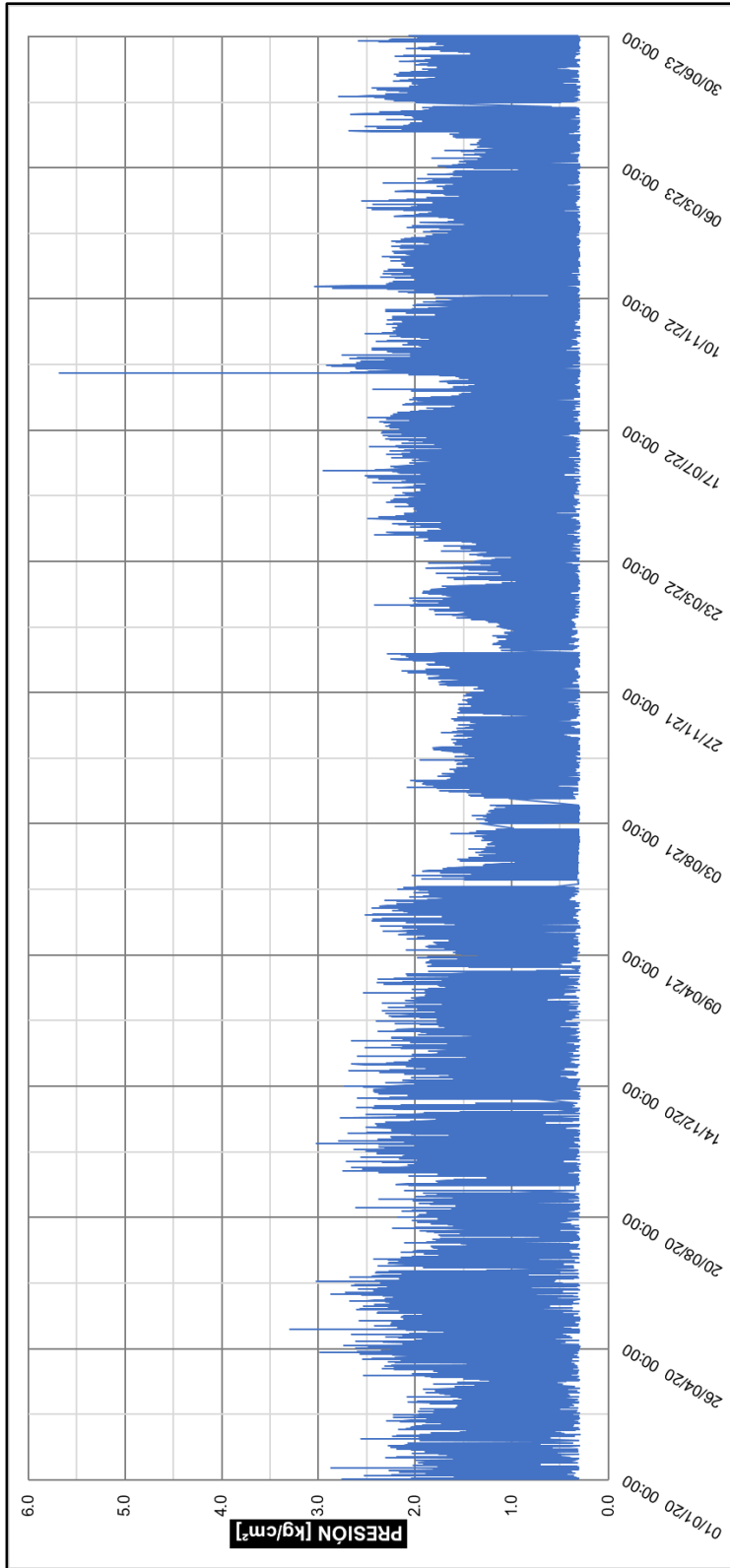


Gráfico B-1.Presión a cada hora en la estación Amores de Enero 2020 a Junio 2023

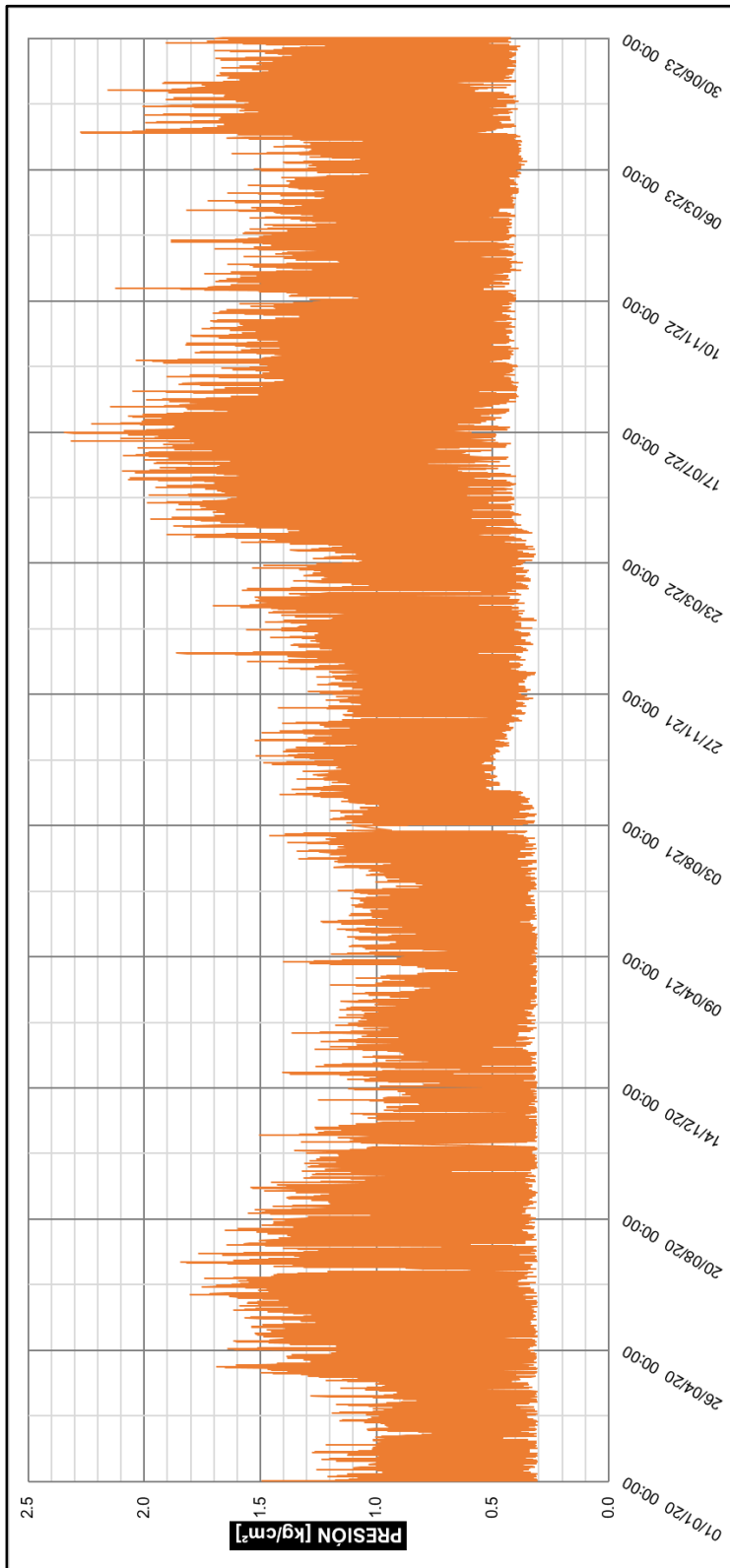


Gráfico B-2.Presión a cada hora en la estación Repúblicas de Enero 2020 a Junio 2023

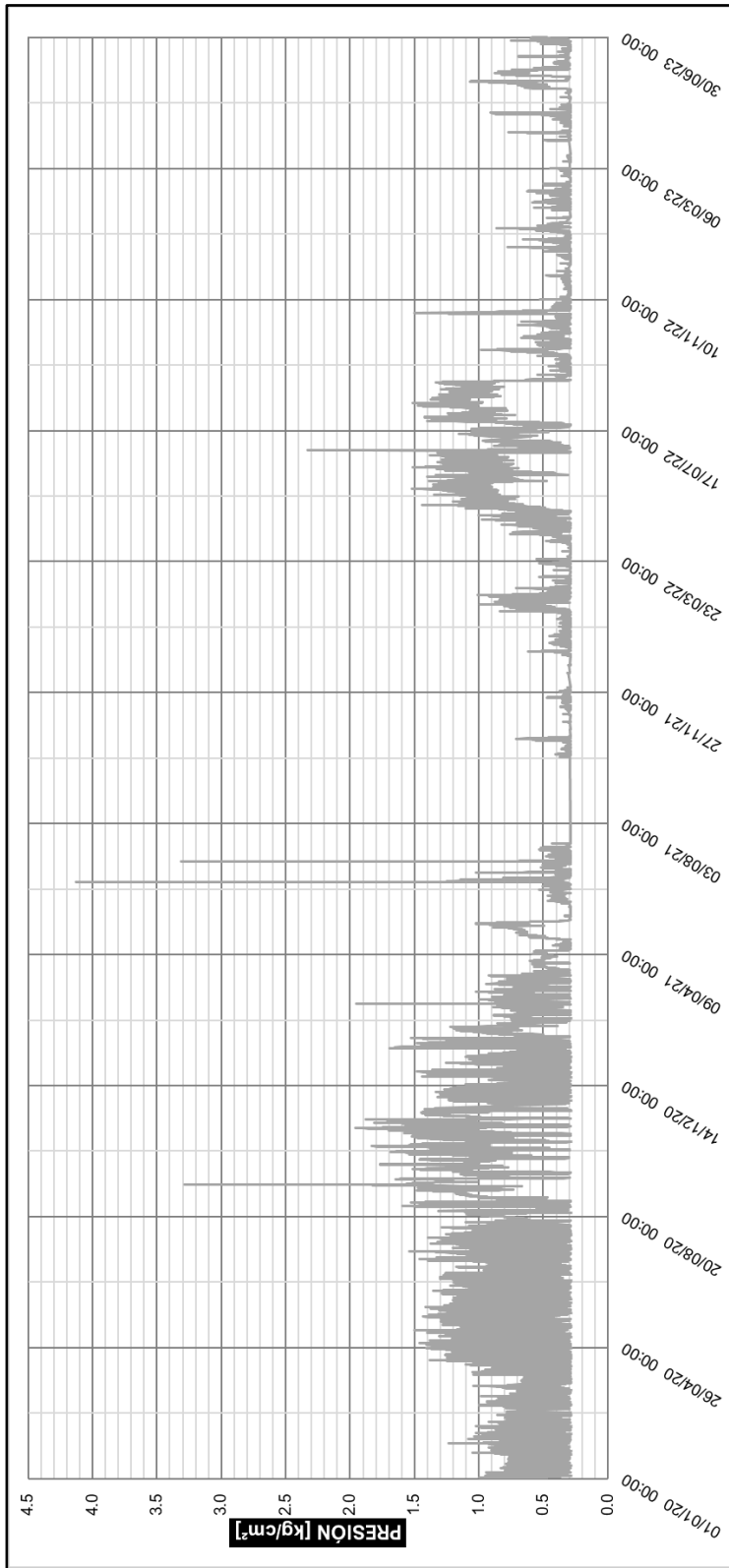


Gráfico B-3. Presión a cada hora en la estación Universidad de Enero 2020 a Junio 2023

ESTACIONES EN CONJUNTO

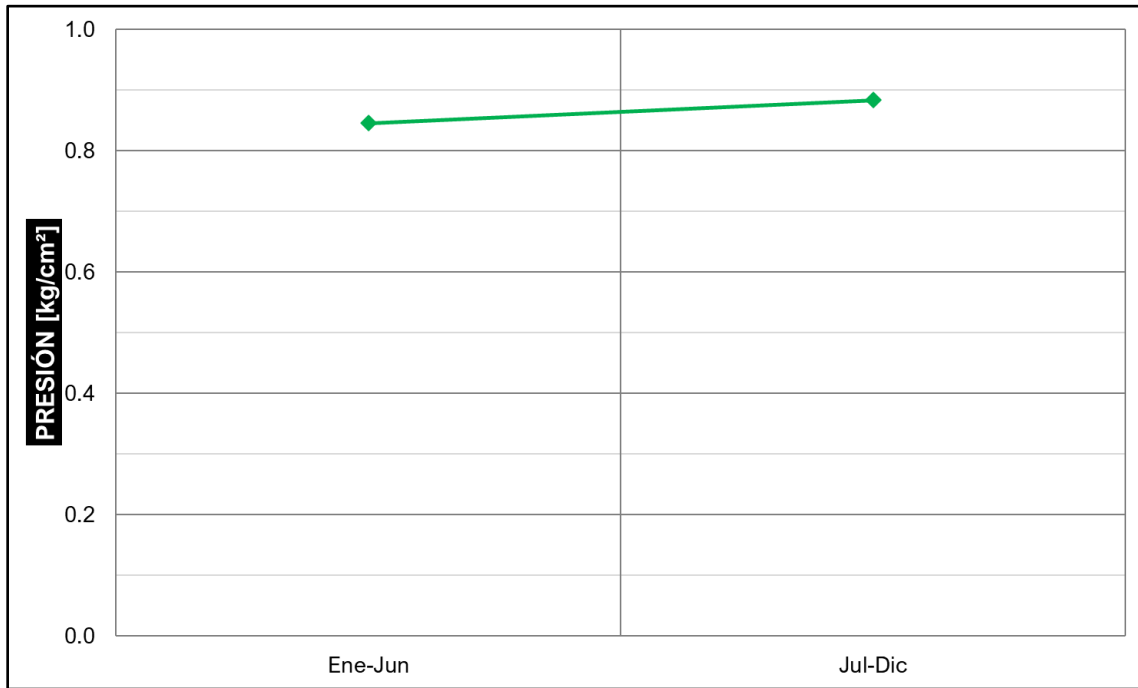


Gráfico B-4. Promedio general de presión por semestre (Enero 2020 – Junio 2023)

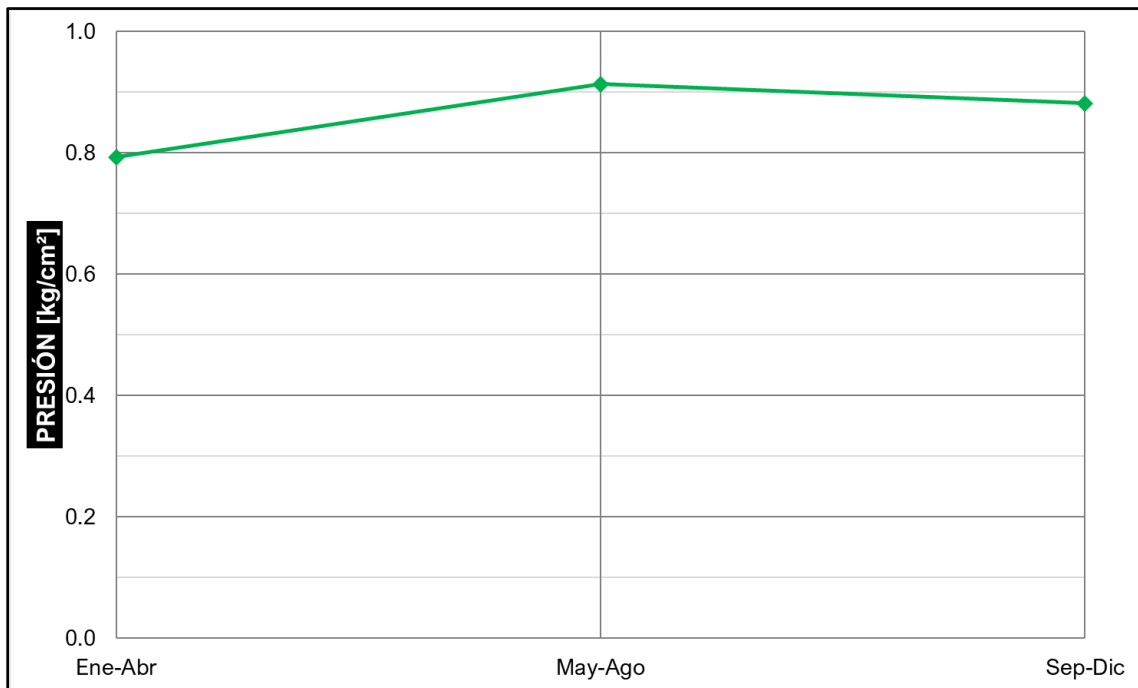


Gráfico B-5. Promedio general de presión por cuatrimestre (Enero 2020 – Junio 2023)

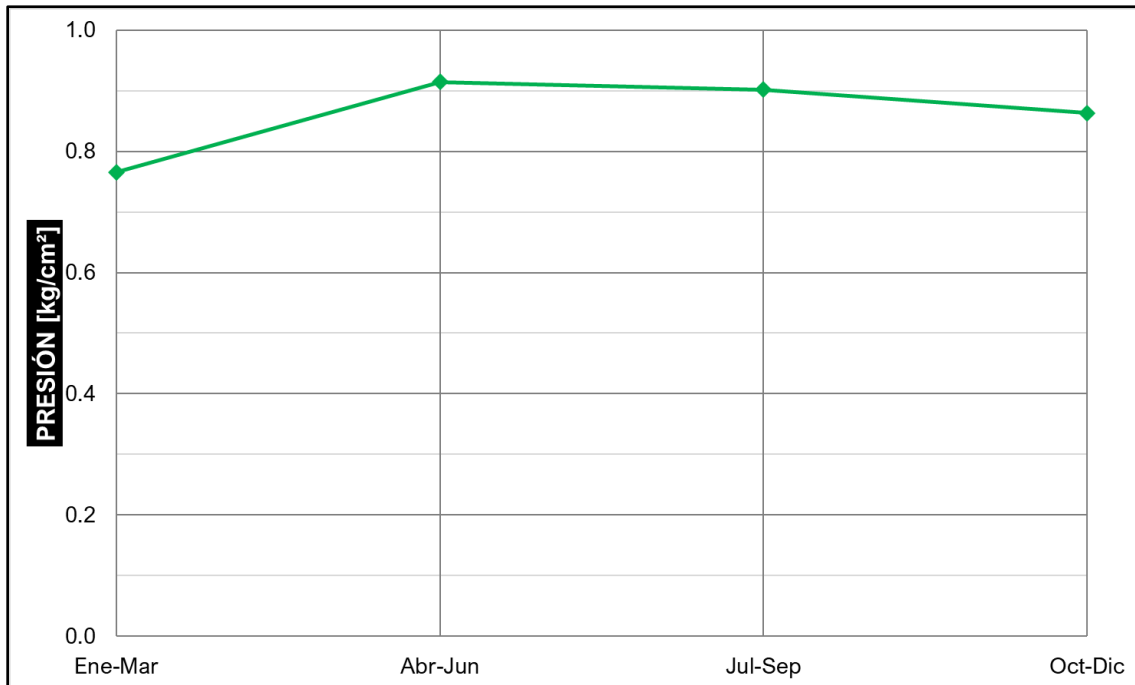


Gráfico B-6. Promedio general de presión por trimestre (Enero 2020 – Junio 2023)

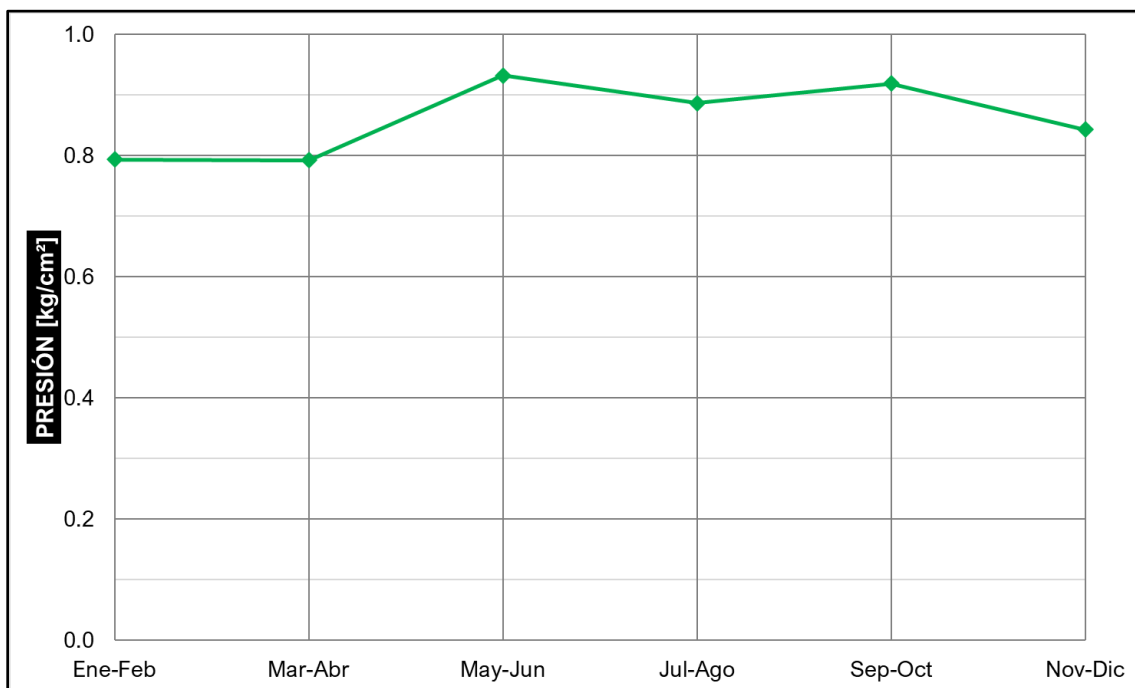


Gráfico B-7. Promedio general de presión por bimestre (Enero 2020 – Junio 2023)

ESTACIÓN AMORES

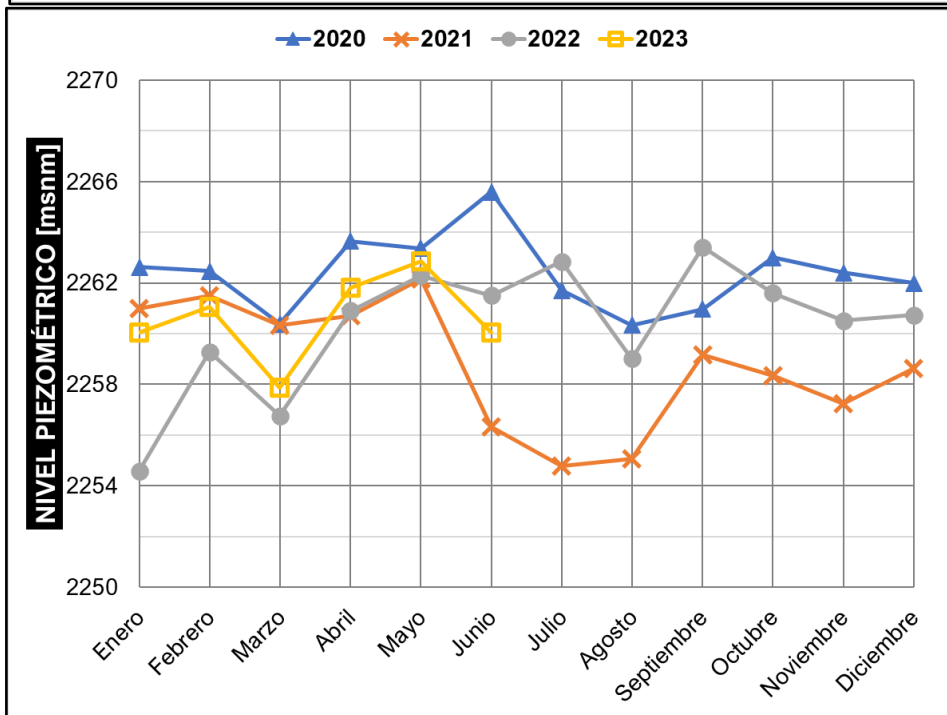
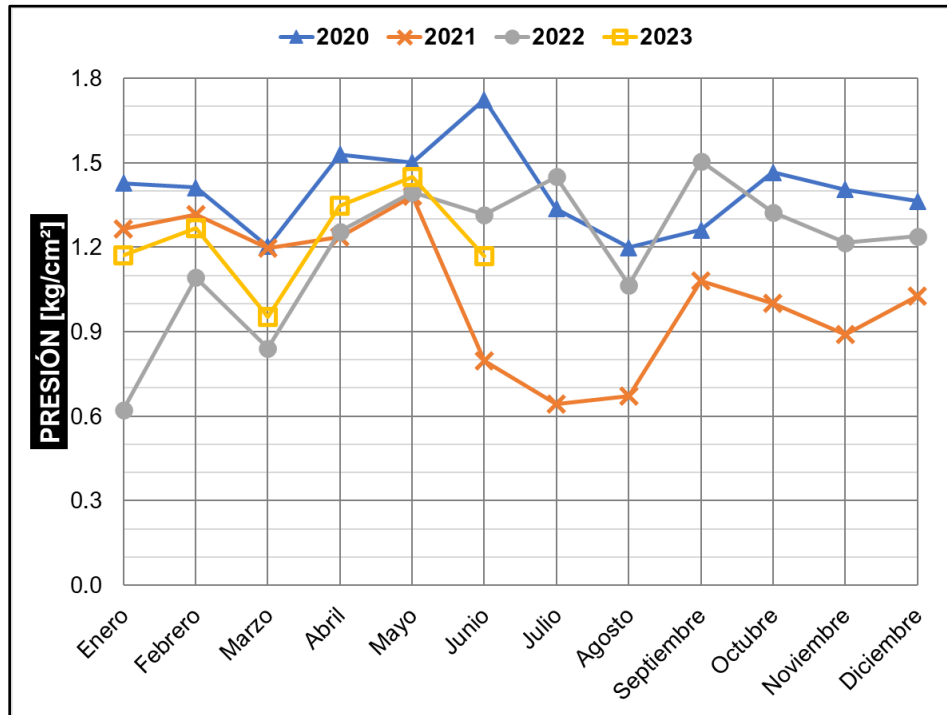


Gráfico B-8a y B-8b. Promedios mensuales de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Amores (Enero 2020 – Junio 2023)

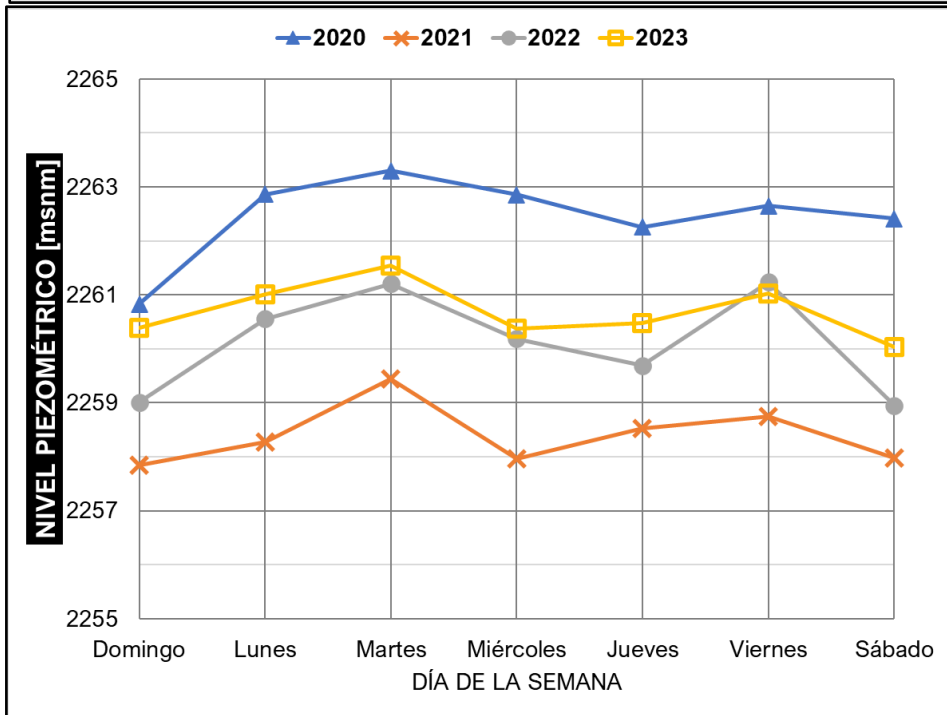
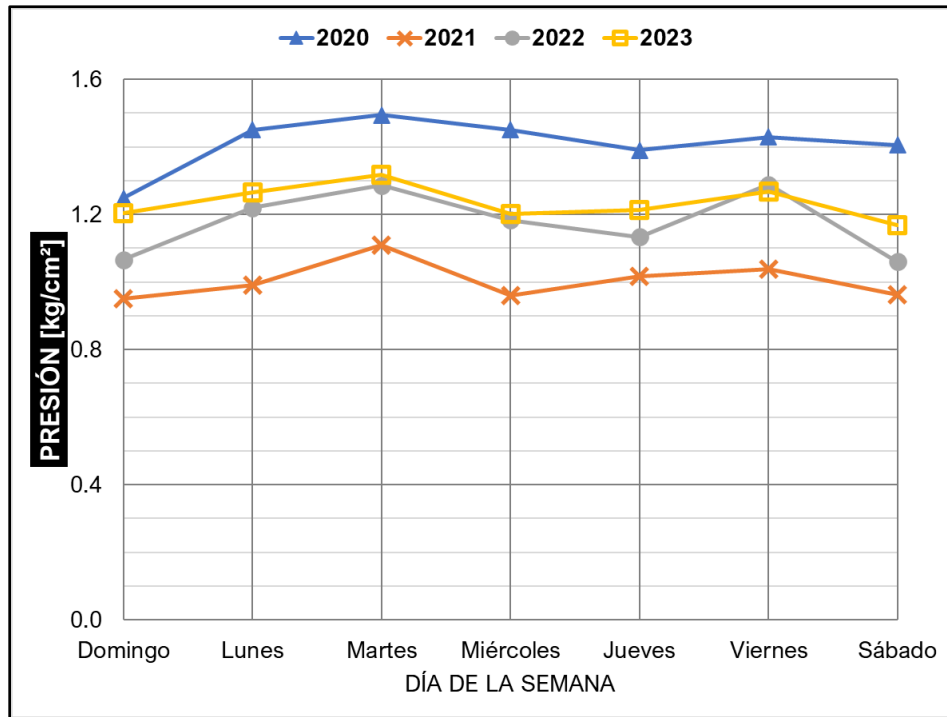


Gráfico B-9a y B-9b. Promedios en la semana de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Amores (Enero 2020 – Junio 2023)

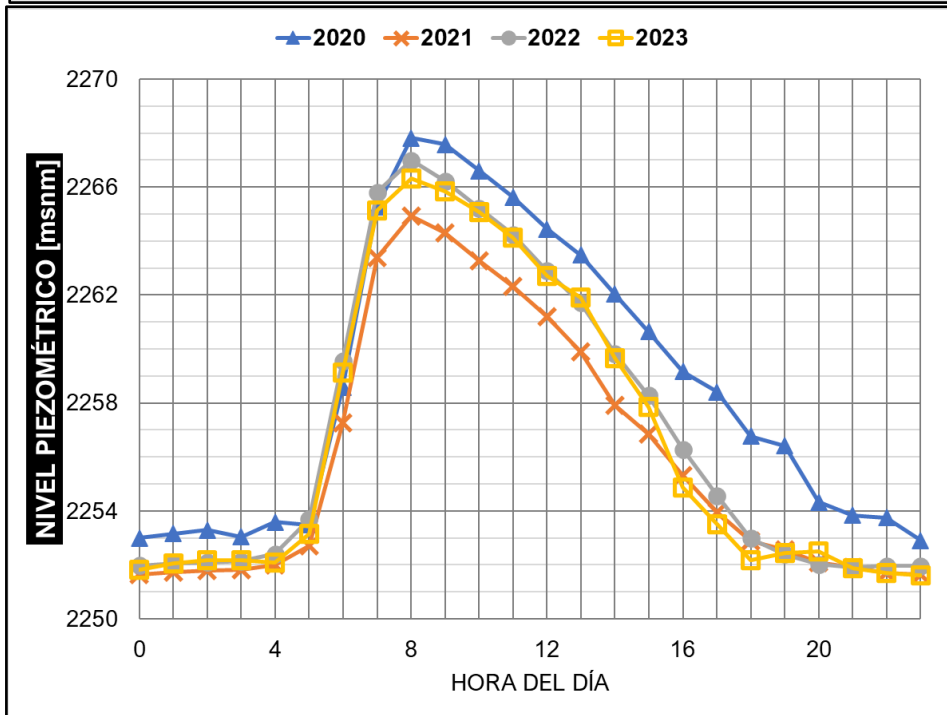
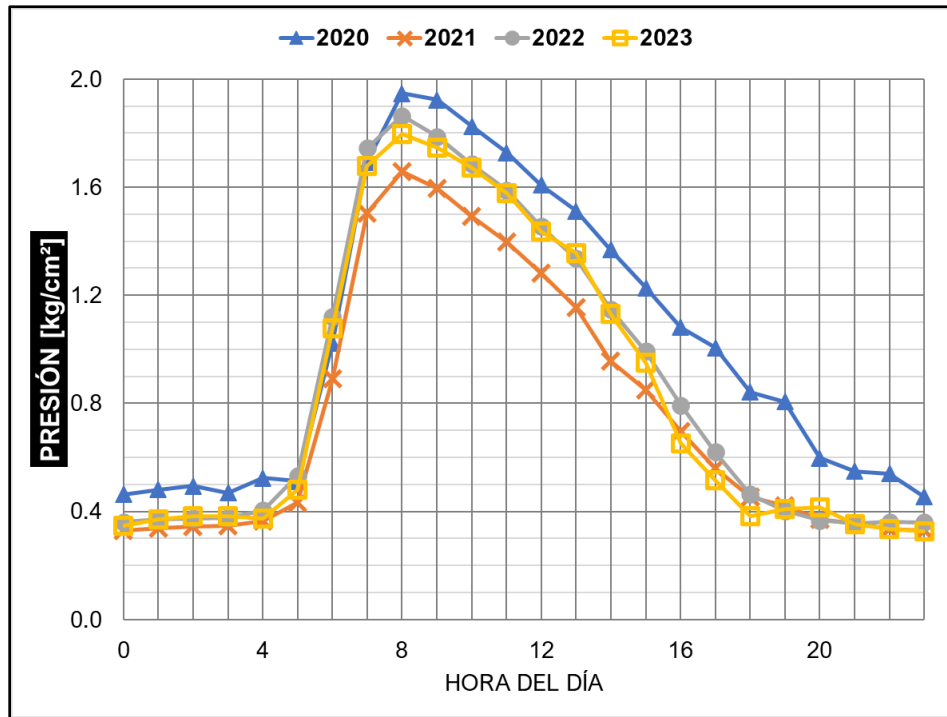


Gráfico B-10a y B-10b. Promedios horario de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Amores (Enero 2020 – Junio 2023)

ESTACIÓN REPÚBLICAS

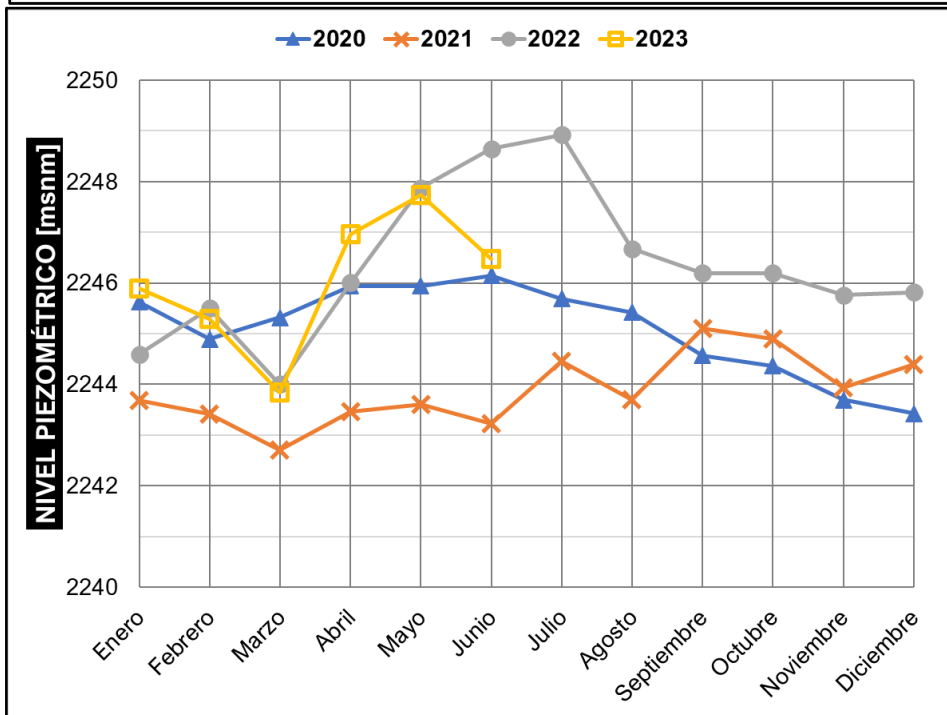
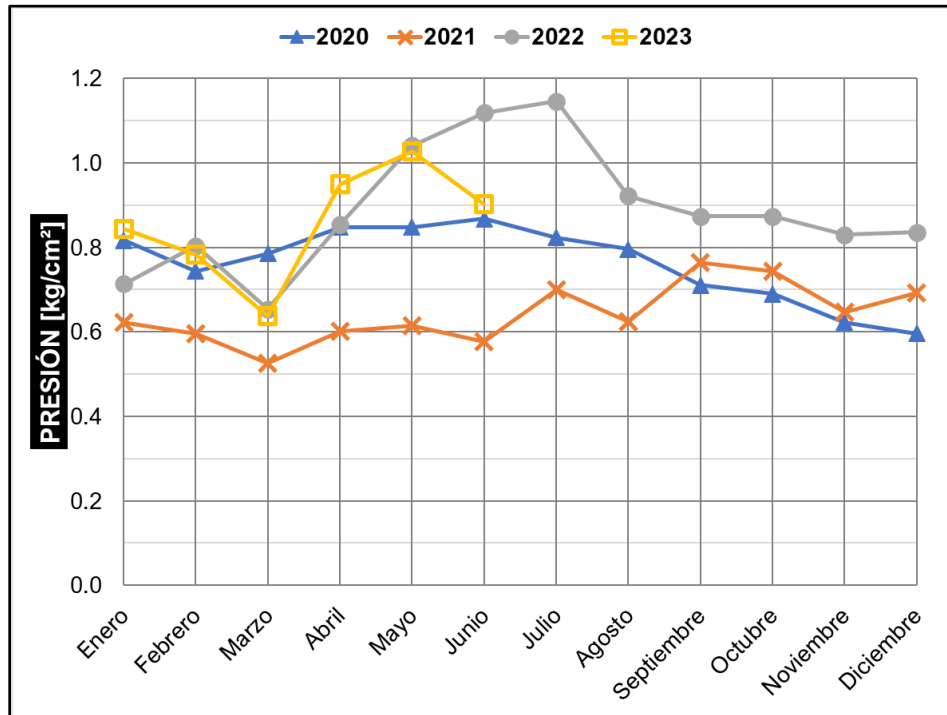


Gráfico B-11a y B-11b. Promedios mensuales de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Repúblicas (Enero 2020 – Junio 2023)

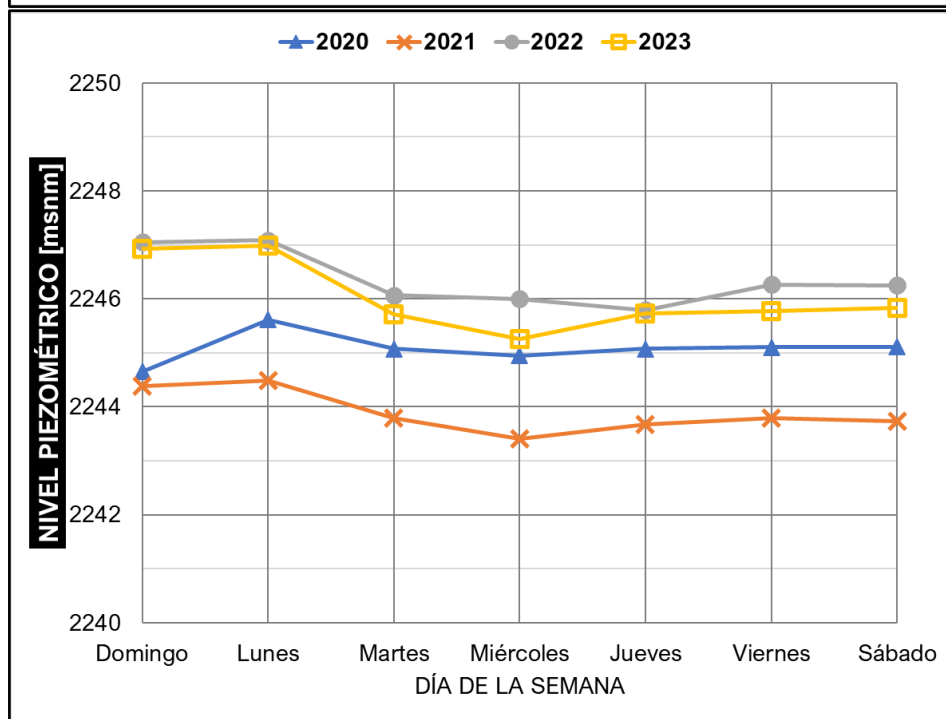
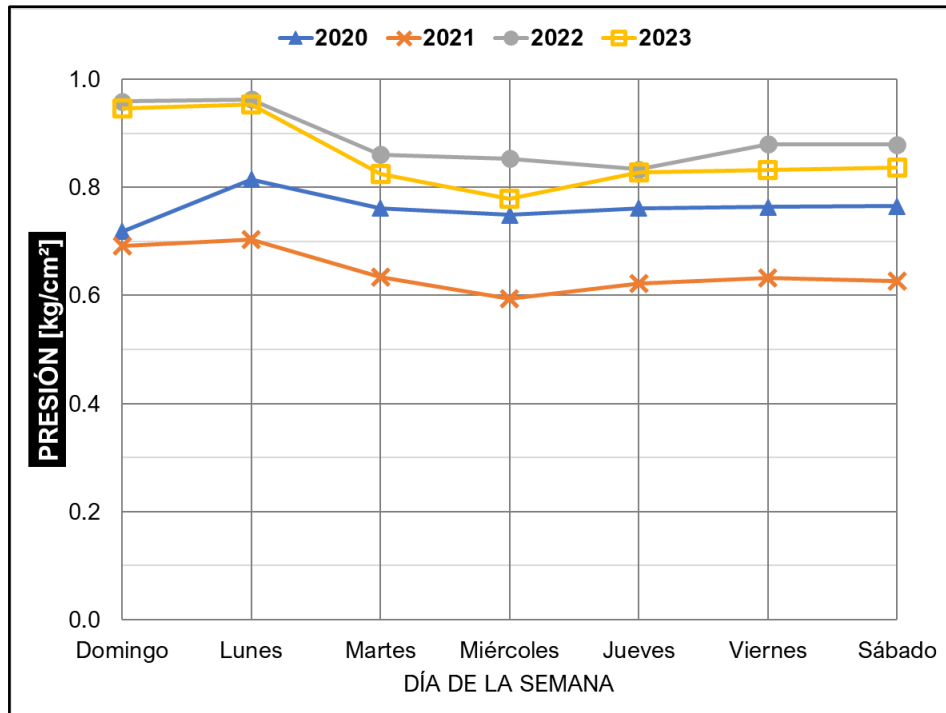


Gráfico B-12a y B-12b. Promedios en la semana de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Repúblicas (Enero 2020 – Junio 2023)

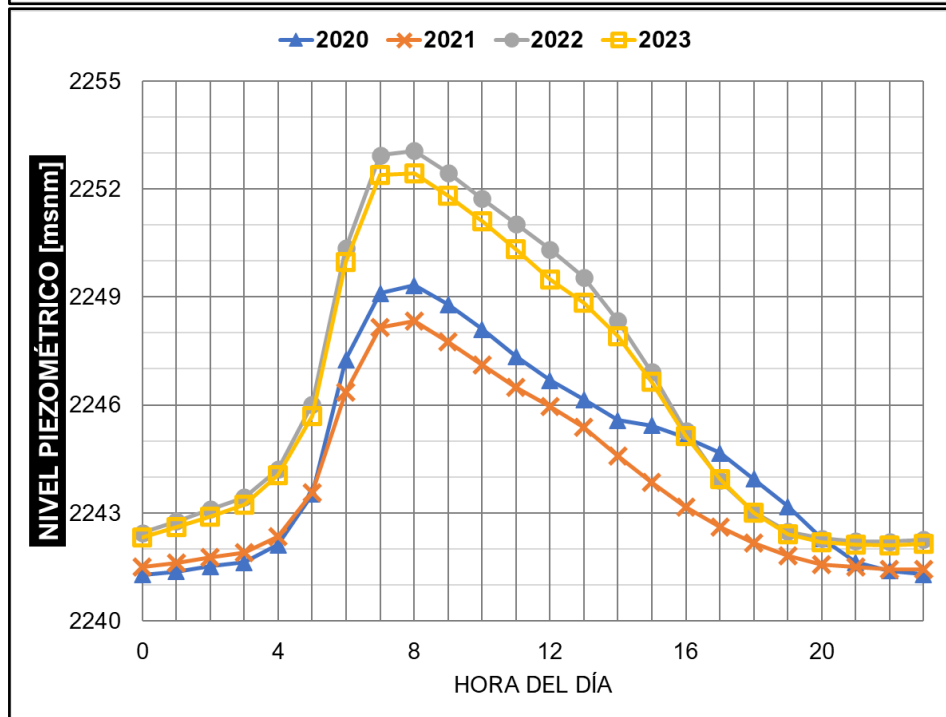
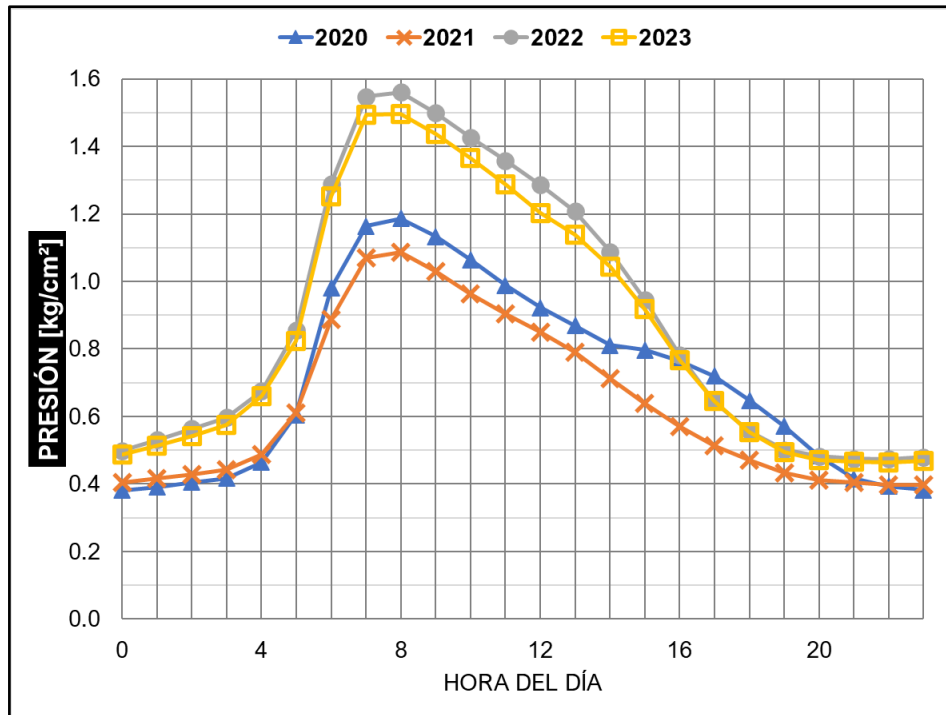


Gráfico B-13a y B-13b. Promedios horario de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Repúblicas (Enero 2020 – Junio 2023)

ESTACIÓN UNIVERSIDAD

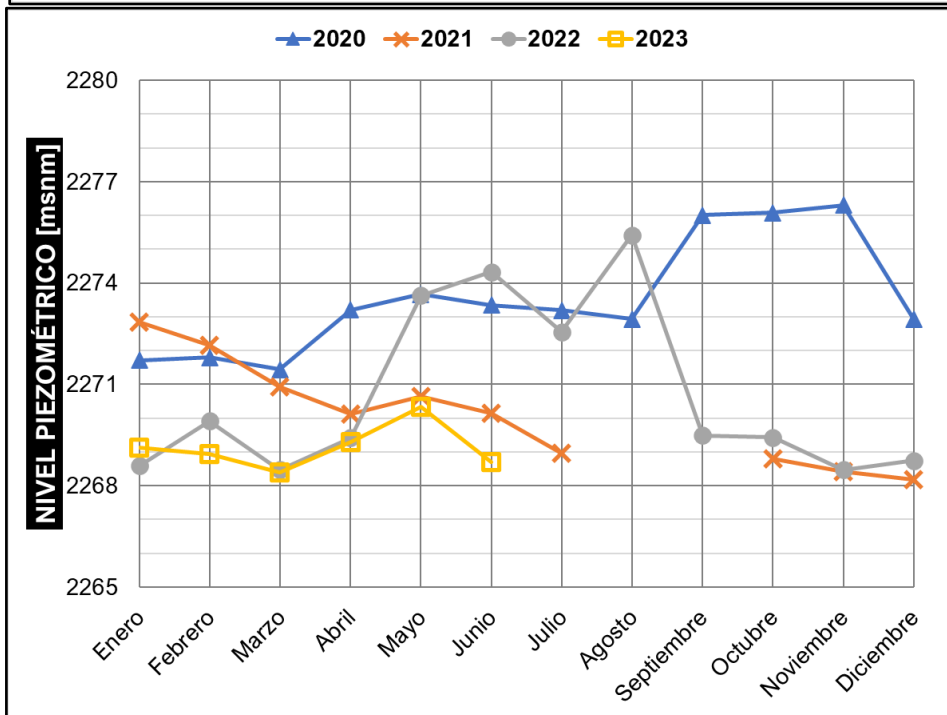
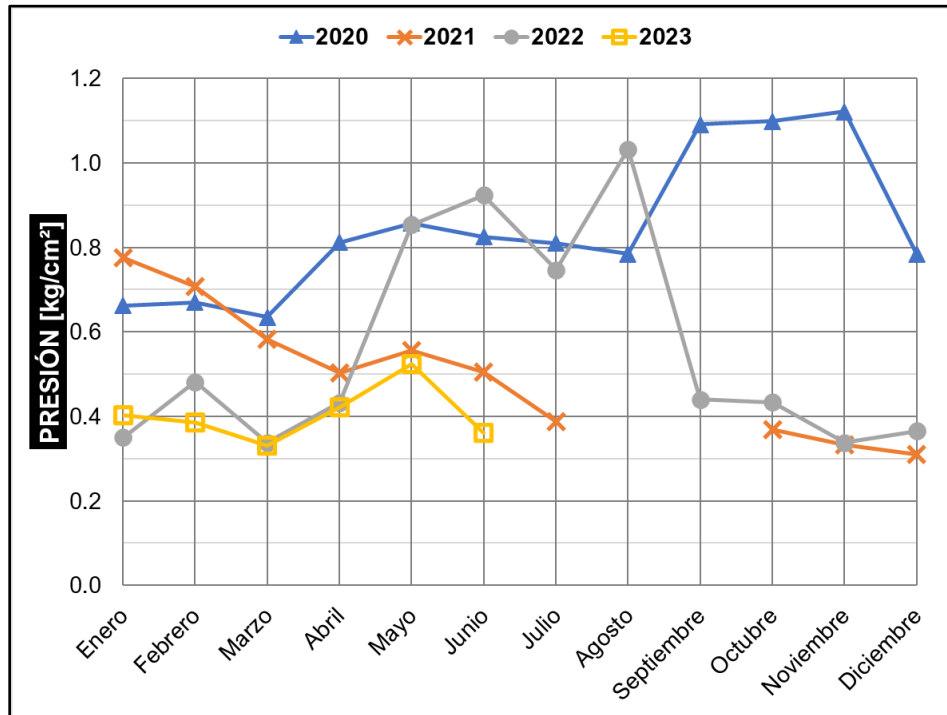


Gráfico B-14a y B-14b. Promedios mensuales de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Universidad (Enero 2020 – Junio 2023)

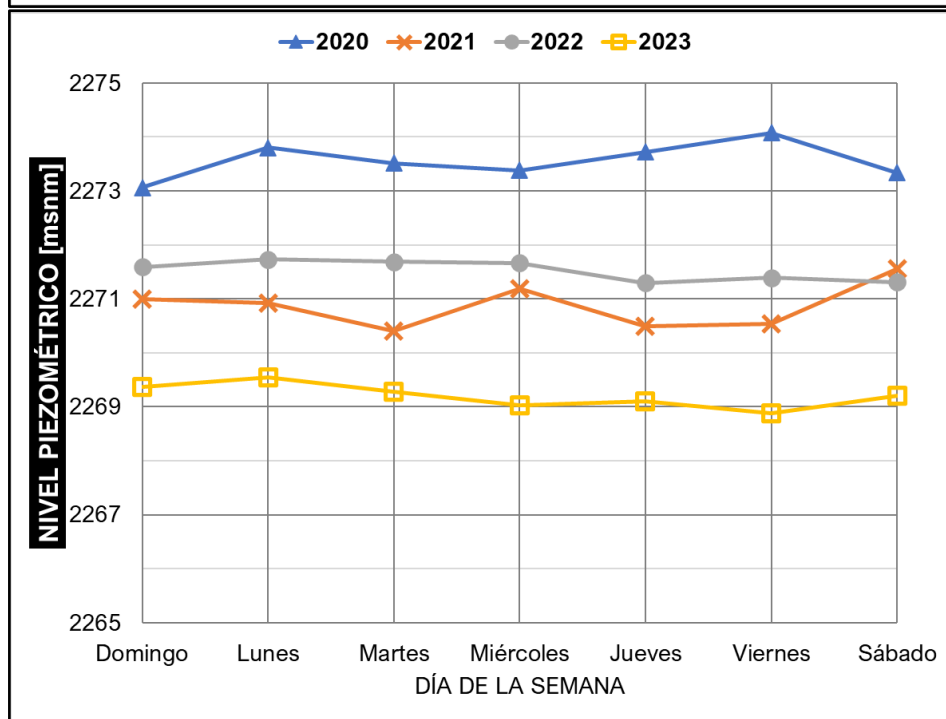
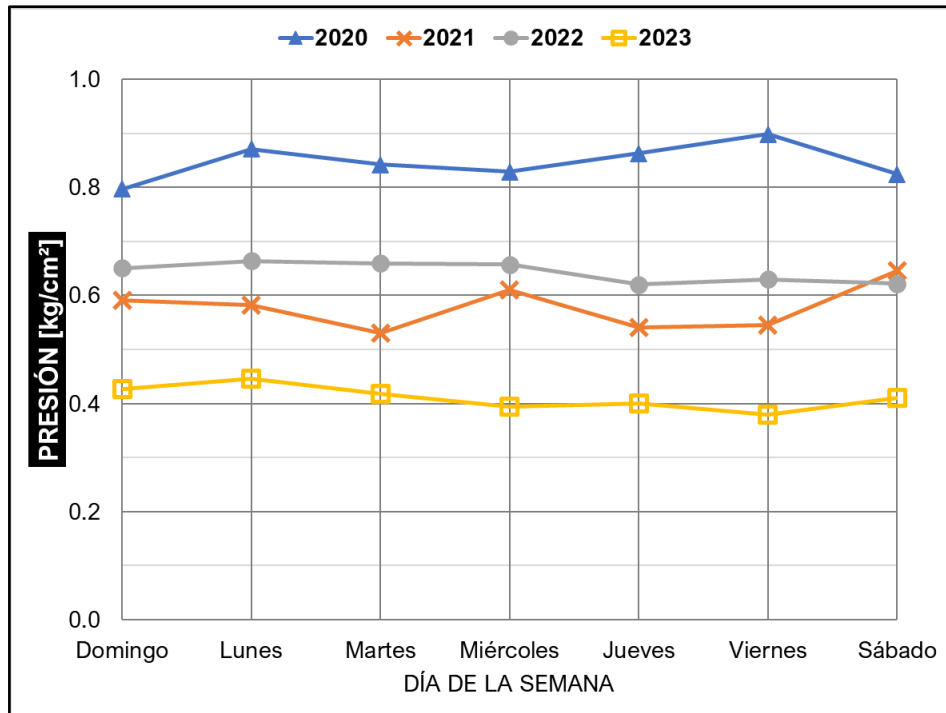


Gráfico B-15a y B-15b. Promedios en la semana de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Universidad (Enero 2020 – Junio 2023)

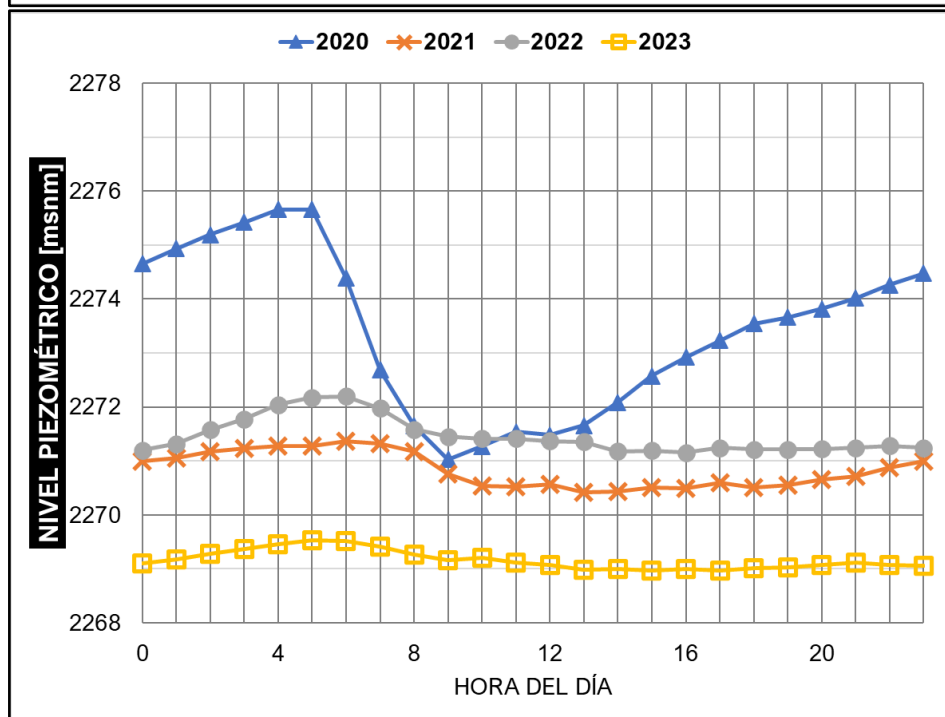
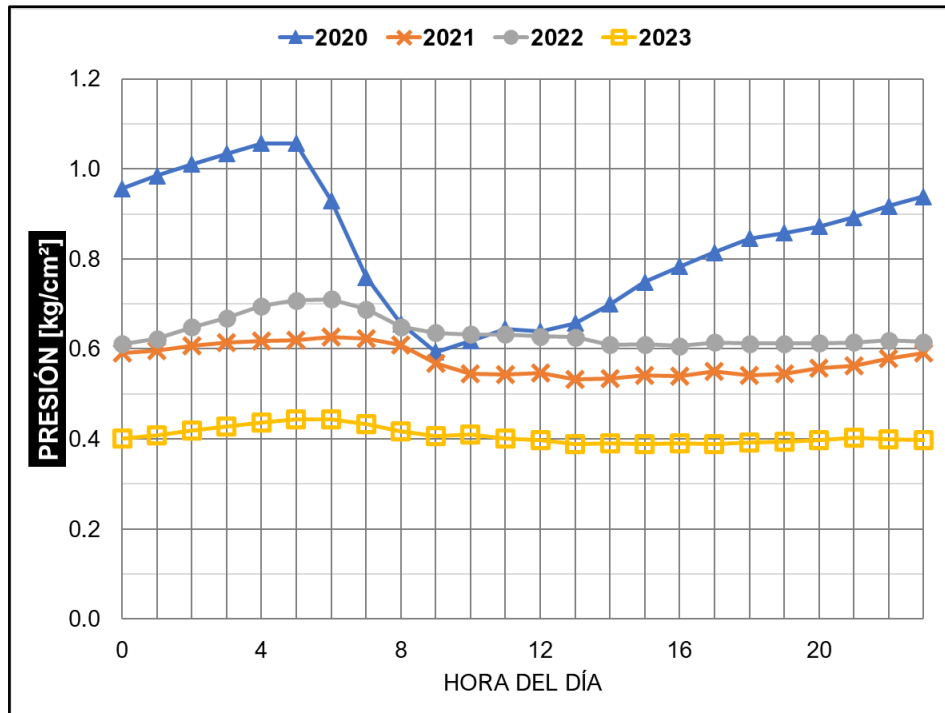


Gráfico B-16a y B-16b. Promedios horario de presión y del nivel piezométrico por año en la estación Universidad (Enero 2020 – Junio 2023)

ANEXO C

Tabla C- 1. Reporte de las presiones registradas en la estación Universidad en el mes de Junio de 2023

| DÍA | HORA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | MÁXIMO | MÍNIMO | PROMEDIO | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|----------|-------|-------|
| | 0hrs | 1hrs | 2hrs | 3hrs | 4hrs | 5hrs | 6hrs | 7hrs | 8hrs | 9hrs | 10hrs | 11hrs | 12hrs | 13hrs | 14hrs | 15hrs | 16hrs | 17hrs | 18hrs | 19hrs | 20hrs | 21hrs | 22hrs | 23hrs | | | | 24hrs | |
| 01 | 0.61 | 0.64 | 0.70 | 0.74 | 0.75 | 0.74 | 0.73 | 0.71 | 0.67 | 0.65 | 0.64 | 0.61 | 0.39 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.75 | 0.31 | 0.497 |
| 02 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.34 | 0.38 | 0.41 | 0.44 | 0.46 | 0.46 | 0.30 | 0.325 | |
| 03 | 0.48 | 0.48 | 0.51 | 0.54 | 0.56 | 0.57 | 0.57 | 0.56 | 0.53 | 0.52 | 0.51 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.49 | 0.49 | 0.50 | 0.50 | 0.49 | 0.41 | 0.38 | 0.35 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.57 | 0.33 | 0.481 |
| 04 | 0.35 | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.37 | 0.38 | 0.37 | 0.36 | 0.34 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.38 | 0.30 | 0.329 | |
| 05 | 0.31 | 0.32 | 0.35 | 0.37 | 0.38 | 0.38 | 0.37 | 0.35 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.38 | 0.30 | 0.323 | |
| 06 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.29 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.35 | 0.35 | 0.29 | 0.303 | |
| 07 | 0.36 | 0.37 | 0.39 | 0.40 | 0.41 | 0.42 | 0.41 | 0.37 | 0.32 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.34 | 0.37 | 0.42 | 0.30 | 0.341 | |
| 08 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.41 | 0.42 | 0.42 | 0.41 | 0.38 | 0.33 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.42 | 0.31 | 0.341 | |
| 09 | 0.32 | 0.32 | 0.34 | 0.36 | 0.37 | 0.39 | 0.38 | 0.37 | 0.35 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.39 | 0.32 | 0.329 | |
| 10 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.32 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.33 | 0.31 | 0.315 | |
| 11 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.33 | 0.31 | 0.316 | |
| 12 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.34 | 0.36 | 0.39 | 0.40 | 0.41 | 0.42 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.47 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.30 | 0.355 | |
| 13 | 0.51 | 0.55 | 0.58 | 0.62 | 0.65 | 0.69 | 0.69 | 0.57 | 0.49 | 0.47 | 0.46 | 0.41 | 0.32 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.69 | 0.31 | 0.440 | |
| 14 | 0.36 | 0.36 | 0.37 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.37 | 0.34 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.38 | 0.31 | 0.331 | |
| 15 | 0.32 | 0.32 | 0.33 | 0.33 | 0.34 | 0.34 | 0.33 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.34 | 0.31 | 0.31 | 0.317 | |
| 16 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.30 | 0.310 | |
| 17 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.39 | 0.38 | 0.32 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.39 | 0.31 | 0.317 | |
| 18 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.29 | 0.29 | 0.299 | |
| 19 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.32 | 0.32 | 0.29 | 0.295 | |
| 20 | 0.34 | 0.35 | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.35 | 0.32 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.36 | 0.30 | 0.320 | |
| 21 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.29 | 0.303 | |
| 22 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.29 | 0.298 | |
| 23 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.33 | 0.35 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.41 | 0.29 | 0.313 | |
| 24 | 0.42 | 0.43 | 0.46 | 0.50 | 0.52 | 0.52 | 0.51 | 0.49 | 0.46 | 0.45 | 0.45 | 0.46 | 0.45 | 0.44 | 0.37 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.31 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.52 | 0.30 | 0.400 | |
| 25 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.29 | 0.291 | |
| 26 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.31 | 0.33 | 0.35 | 0.37 | 0.39 | 0.42 | 0.49 | 0.54 | 0.55 | 0.57 | 0.57 | 0.29 | 0.345 | | |
| 27 | 0.58 | 0.59 | 0.62 | 0.66 | 0.70 | 0.75 | 0.74 | 0.69 | 0.59 | 0.55 | 0.55 | 0.56 | 0.55 | 0.55 | 0.55 | 0.55 | 0.54 | 0.42 | 0.35 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.75 | 0.33 | 0.529 | | |
| 28 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.31 | 0.31 | 0.32 | 0.34 | 0.37 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.44 | 0.44 | 0.45 | 0.47 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.31 | 0.370 | |
| 29 | 0.51 | 0.54 | 0.58 | 0.59 | 0.60 | 0.60 | 0.59 | 0.57 | 0.55 | 0.52 | 0.51 | 0.50 | 0.47 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.47 | 0.48 | 0.49 | 0.51 | 0.60 | 0.46 | 0.510 | |
| 30 | 0.53 | 0.55 | 0.56 | 0.56 | 0.57 | 0.58 | 0.57 | 0.54 | 0.48 | 0.47 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.51 | 0.53 | 0.54 | 0.58 | 0.47 | 0.512 | | |
| MÁXIMO | 0.61 | 0.64 | 0.70 | 0.74 | 0.75 | 0.75 | 0.74 | 0.71 | 0.67 | 0.65 | 0.64 | 0.61 | 0.55 | 0.55 | 0.55 | 0.54 | 0.50 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.54 | 0.55 | 0.57 | 0.58 | 0.75 | 0.49 | 0.606 | | |
| MÍNIMO | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.29 | 0.29 | 0.287 | |
| PROMEDIO | 0.36 | 0.37 | 0.38 | 0.39 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.38 | 0.36 | 0.35 | 0.35 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.35 | 0.40 | 0.34 | 0.34 | 0.359 | |

Tabla C-2.Desviación estándar de los niveles de presión [msnm] en cada estación por año, mes y hora

| AÑO | | | | | | | | |
|--------------------|-------|---------|------------|---------|-----------|-----------|-------|-------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | | | | |
| Amores | 6.105 | 5.735 | 6.742 | 6.269 | | | | |
| Repúblicas | 3.622 | 2.823 | 4.629 | 4.486 | | | | |
| Universidad | 3.347 | 2.607 | 3.165 | 1.455 | | | | |
| MES | | | | | | | | |
| | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | | |
| Amores | 6.121 | 5.712 | 5.039 | 6.175 | 6.166 | 7.168 | | |
| Repúblicas | 3.401 | 3.382 | 3.052 | 4.399 | 4.557 | 4.634 | | |
| Universidad | 2.676 | 2.206 | 1.849 | 2.608 | 2.971 | 3.480 | | |
| MES | | | | | | | | |
| | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | | |
| Amores | 6.315 | 5.433 | 7.083 | 6.296 | 6.544 | 6.635 | | |
| Repúblicas | 4.732 | 4.146 | 3.738 | 3.707 | 3.467 | 3.426 | | |
| Universidad | 2.977 | 2.593 | 4.329 | 4.320 | 4.924 | 3.397 | | |
| HORA | | | | | | | | |
| | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 |
| Amores | 0.819 | 0.891 | 0.986 | 1.011 | 1.427 | 2.426 | 4.948 | 5.277 |
| Repúblicas | 1.053 | 1.163 | 1.264 | 1.407 | 2.066 | 2.790 | 3.207 | 3.317 |
| Universidad | 3.366 | 3.514 | 3.752 | 3.790 | 3.796 | 3.778 | 3.558 | 3.464 |
| HORA | | | | | | | | |
| | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Amores | 4.555 | 4.236 | 4.028 | 4.060 | 4.392 | 4.562 | 4.905 | 5.005 |
| Repúblicas | 3.192 | 3.101 | 3.007 | 2.938 | 2.984 | 3.168 | 3.350 | 3.482 |
| Universidad | 3.386 | 3.124 | 3.081 | 3.136 | 3.144 | 3.062 | 2.741 | 2.682 |
| HORA | | | | | | | | |
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| Amores | 4.624 | 4.397 | 3.749 | 3.466 | 2.576 | 1.729 | 1.207 | 0.820 |
| Repúblicas | 3.195 | 2.803 | 2.287 | 1.838 | 1.435 | 1.184 | 1.038 | 1.034 |
| Universidad | 2.737 | 2.772 | 2.837 | 2.868 | 2.915 | 3.006 | 3.101 | 3.237 |

ESTACIONES EN CONJUNTO

Tabla C-3. Desviación estándar de los promedios presión [kg/cm²] en cada estación por semestre, cuatrimestre, trimestre y bimestre de los datos en conjunto

| SEMESTRE | | | |
|------------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| <i>Enero - Junio</i> | | <i>Julio - Diciembre</i> | |
| 0.502 | | 0.504 | |
| CUATRIMESTRE | | | |
| <i>Enero - Abril</i> | | <i>Mayo - Agosto</i> | <i>Septiembre - Diciembre</i> |
| 0.466 | | 0.517 | 0.523 |
| TRIMESTRE | | | |
| <i>Enero - Marzo</i> | <i>Abril - Junio</i> | <i>Julio - Septiembre</i> | <i>Octubre - Diciembre</i> |
| 0.437 | 0.543 | 0.492 | 0.517 |
| BIMESTRE | | | |
| <i>Enero - Febrero</i> | | <i>Marzo - Abril</i> | <i>Mayo - Junio</i> |
| 0.454 | | 0.477 | 0.547 |
| BIMESTRE | | | |
| <i>Julio - Agosto</i> | | <i>Septiembre - Octubre</i> | <i>Noviembre - Diciembre</i> |
| 0.468 | | 0.529 | 0.515 |

ESTACIÓN AMORES

Tabla C-4. Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-8a y B-8b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | | |
|------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|------------|------------|------------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| <i>Promedio Máximo</i> | 1.724 (Jun) | 1.381 (May) | 1.506 (Sep) | 1.450 (May) | 2266 (Jun) | 2262 (May) | 2263 (Sep) | 2263 (May) |
| <i>Promedio Mínimo</i> | 1.200 (Ago) | 0.643 (Jul) | 0.623 (Ene) | 0.953 (Mar) | 2260 (Ago) | 2255 (Jul) | 2255 (Ene) | 2258 (Mar) |

Tabla C-5. Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-9a y B-9b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | | |
|------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|------------|------------|------------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| <i>Promedio Máximo</i> | 1.495 (Mar) | 1.109 (Mar) | 1.288 (Vie) | 1.319 (Mar) | 2263 (Mar) | 2259 (Mar) | 2261 (Vie) | 2262 (Mar) |
| <i>Promedio Mínimo</i> | 1.248 (Dom) | 0.950 (Dom) | 1.060 (Sáb) | 1.167 (Sáb) | 2261 (Dom) | 2258 (Dom) | 2259 (Sáb) | 2260 (Sáb) |

Tabla C-6. Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-10a y B-10b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | | |
|------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| <i>Promedio Máximo</i> | 1.947 (08 h) | 1.657 (08 h) | 1.864 (08 h) | 1.797 (08 h) | 2268 (08 h) | 2265 (08 h) | 2267 (08 h) | 2266 (08 h) |
| <i>Promedio Mínimo</i> | 0.455 (23 h) | 0.329 (00 h) | 0.356 (21 h) | 0.326 (23 h) | 2253 (23 h) | 2252 (00 h) | 2252 (21 h) | 2252 (23 h) |

ESTACIÓN REPÚBLICAS

Tabla C-7. Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-11a y B-11b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | | |
|------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|------------|------------|------------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| Promedio Máximo | 0.868 (Jun) | 0.764 (Sep) | 1.146 (Jul) | 1.027 (May) | 2246 (Jun) | 2245 (Sep) | 2249 (Jul) | 2248 (May) |
| Promedio Mínimo | 0.597 (Dic) | 0.525 (Mar) | 0.654 (Mar) | 0.638 (Mar) | 2243 (Dic) | 2243 (Mar) | 2244 (Mar) | 2244 (Mar) |

Tabla C-8. Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-12a y B-12b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | | |
|------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|------------|------------|------------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| Promedio Máximo | 0.815 (Lun) | 0.703 (Lun) | 0.963 (Lun) | 0.953 (Lun) | 2246 (Lun) | 2244 (Lun) | 2247 (Lun) | 2247 (Lun) |
| Promedio Mínimo | 0.719 (Dom) | 0.594 (Mié) | 0.833 (Jue) | 0.779 (Mié) | 2245 (Dom) | 2243 (Mié) | 2246 (Jue) | 2245 (Mié) |

Tabla C-9. Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-13a y B-13b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | | |
|------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| Promedio Máximo | 1.186 (08 h) | 1.087 (08 h) | 1.560 (08 h) | 1.497 (08 h) | 2249 (08 h) | 2248 (08 h) | 2253 (08 h) | 2252 (08 h) |
| Promedio Mínimo | 0.382 (00 h) | 0.397 (23 h) | 0.474 (22 h) | 0.463 (22 h) | 2241 (00 h) | 2241 (23 h) | 2242 (22 h) | 2242 (22 h) |

ESTACIÓN UNIVERSIDAD

Tabla C-10. Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-14a y B-14b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | | |
|------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|------------|------------|------------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| Promedio Máximo | 1.122 (Nov) | 0.776 (Ene) | 1.033 (Ago) | 0.525 (May) | 2276 (Nov) | 2273 (Ene) | 2275 (Ago) | 2270 (May) |
| Promedio Mínimo | 0.635 (Mar) | 0.310 (Dic) | 0.338 (Mar) | 0.330 (Mar) | 2271 (Mar) | 2268 (Dic) | 2268 (Mar) | 2268 (Mar) |

Tabla C-11. Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-15a y B-15b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | | |
|------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|------------|------------|------------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| Promedio Máximo | 0.898 (Vie) | 0.646 (Sáb) | 0.664 (Lun) | 0.446 (Lun) | 2274 (Vie) | 2272 (Sáb) | 2272 (Lun) | 2270 (Lun) |
| Promedio Mínimo | 0.797 (Dom) | 0.531 (Mar) | 0.620 (Jue) | 0.379 (Vie) | 2273 (Dom) | 2270 (Mar) | 2271 (Jue) | 2269 (Vie) |

Tabla C-12. Promedios máximos y mínimos en cada año del gráfico B-16a y B-16b

| | PRESIÓN [kg/cm ²] | | | | NIVEL PIEZOMÉTRICO [msnm] | | | |
|------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| Promedio Máximo | 1.057 (05 h) | 0.627 (06 h) | 0.711 (06 h) | 0.443 (05 h) | 2276 (05 h) | 2271 (06 h) | 2272 (06 h) | 2270 (05 h) |
| Promedio Mínimo | 0.594 (09 h) | 0.532 (13 h) | 0.607 (16 h) | 0.388 (17 h) | 2271 (09 h) | 2270 (13 h) | 2271 (16 h) | 2269 (17 h) |

Tabla C-13. Aumentos y disminuciones en los promedios mensuales de la presión [kg/cm²]

| AMORES | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| 2020 | | -0.016 | -0.209 | 0.326 | -0.028 | 0.222 | -0.388 | -0.137 | 0.062 | 0.205 | -0.061 | -0.041 |
| 2021 | -0.100 | 0.051 | -0.119 | 0.041 | 0.144 | -0.585 | -0.154 | 0.029 | 0.409 | -0.080 | -0.111 | 0.137 |
| 2022 | -0.404 | 0.470 | -0.252 | 0.414 | 0.139 | -0.080 | 0.135 | -0.384 | 0.440 | -0.182 | -0.109 | 0.023 |
| 2023 | -0.068 | 0.099 | -0.316 | 0.394 | 0.103 | -0.281 | | | | | | |
| REPÚBLICAS | | | | | | | | | | | | |
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| 2020 | | -0.073 | 0.042 | 0.063 | 0.000 | 0.020 | -0.045 | -0.027 | -0.085 | -0.020 | -0.067 | -0.027 |
| 2021 | 0.026 | -0.027 | -0.070 | 0.076 | 0.014 | -0.038 | 0.123 | -0.075 | 0.140 | -0.020 | -0.097 | 0.046 |
| 2022 | 0.021 | 0.090 | -0.150 | 0.201 | 0.186 | 0.078 | 0.027 | -0.225 | -0.049 | 0.000 | -0.043 | 0.005 |
| 2023 | 0.007 | -0.060 | -0.145 | 0.313 | 0.077 | -0.125 | | | | | | |
| UNIVERSIDAD | | | | | | | | | | | | |
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| 2020 | | 0.008 | -0.035 | 0.177 | 0.046 | -0.032 | -0.015 | -0.026 | 0.307 | 0.008 | 0.022 | -0.337 |
| 2021 | -0.009 | -0.068 | -0.125 | -0.079 | 0.052 | -0.051 | -0.117 | -0.388 | | | -0.037 | -0.022 |
| 2022 | 0.040 | 0.132 | -0.144 | 0.095 | 0.422 | 0.070 | -0.177 | 0.286 | -0.593 | -0.007 | -0.095 | 0.027 |
| 2023 | 0.038 | -0.017 | -0.055 | 0.090 | 0.104 | -0.163 | | | | | | |