



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD  
CIUDAD UNIVERSITARIA  
CONTEXTOS URBANOS

**APORTES PARA UNA GESTIÓN INTEGRADA DEL AGUA EN CIUDAD  
UNIVERSITARIA, UNAM**

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

**PRESENTA:**  
MELISSA LÓPEZ PORTILLO PURATA

**TUTOR PRINCIPAL**

DRA LYSSETTE ELENA MUÑOZ VILLERS  
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR**

DRA SILKE CRAM HEYDRICH  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

DR ITZKUAUHTLI BENEDICTO ZAMORA SAENZ  
INSTITUTO BELISARIO DOMÍNGUEZ DEL SENADO DE LA REPÚBLICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

**Coordinación de Estudios de Posgrado**  
**Ciencias de la Sostenibilidad**  
**Oficio: CGEP /PCS/274/2023**  
**Asunto: Asignación de Jurado**

**M. en C. Ivonne Ramírez Wence**  
**Directora General de Administración Escolar**  
**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**Presente**

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su sesión 95 del 10 de octubre del presente año, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, de la alumna **López Portillo Purata Melissa** con número de cuenta **414002122**, con la tesis titulada "Aportes para una gestión integrada del agua en Ciudad Universitaria, UNAM", bajo la dirección de la Dra. Lyssette Elena Muñoz Villers.

PRESIDENTA: DRA. ELENA TUDELA RIVADENEYRA  
VOCAL: DRA. BERTHA HERNÁNDEZ AGUILAR  
SECRETARIA: DRA. SILKE CRAM HEYDRICH  
VOCAL: DR. LUIS ZAMBRANO GONZÁLEZ  
VOCAL: DR. ITZKUAUHTLI BENEDICTO ZAMORA SAENZ

Sin más por el momento me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE,**

**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
**Cd. Universitaria, Cd. Mx., 04 de diciembre de 2023.**



**Dr. Alonso Aguilar Ibarra**  
**Coordinador**  
**Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM**





### *Agradecimientos académicos*

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad por darme la oportunidad de estudiar lo que me apasiona en un lugar que amo.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto (CVU: 1147237).

Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAyCC) por la Beca de Apoyo para la Obtención de Grado mediante un Fondo Especial de Ingresos Extraordinarios y por la oportunidad de presentar mi proyecto en el Segundo Congreso Estudiantil del ICAyCC.

A mi comité tutor, la Dra. Silke Cram y el Dr. Itzkuauhtli Zamora, por sus observaciones, comentarios y el tiempo dedicado en la revisión y fortalecimiento de este trabajo.

A mi jurado, la Dra. Bertha Hernández, el Dr. Luis Zambrano y la Maestra Elena Tudela, por sus múltiples sugerencias y retroalimentación para enriquecer y mejorar esta tesis.

A la Dirección General de Obras y Conservación (DGOC) por apoyarme durante los muestreos, especialmente al Arq. Wilfredo por toda su ayuda y a los jardineros que me acompañaron.

Al Club de Fútbol Pumitas CU, sobre todo a Don Pablo Rodríguez, por su hospitalidad y disponibilidad, permitiéndome realizar mis muestreos y compartiéndome algunas de sus tantas historias y conocimientos sobre el campus.

A la Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (SEREPSA) por compartirme información de gran importancia para este proyecto.

Al Programa de Manejo, Uso y Reuso del agua en la UNAM (PUMAGUA), especialmente al Ing. Josué Hidalgo por todas las respuestas a mis muchas preguntas, su disponibilidad y por haberme conectado con otros agentes fundamentales para este trabajo.

### *Agradecimientos personales*

A la Dra. Lyssette Muñoz Villers, mi tutora, por la paciencia, comprensión y porras a lo largo de estos años. También por siempre impulsarme a hacer cosas aunque me dan miedo, son fundamentales para mi formación académica. ¡Lo logramos!

A la Dra. Beatriz Marín del INECOL por la disposición y ayuda a través de múltiples asesorías y explicaciones por videollamada y mensaje, además de la construcción del Infiltrómetro, mi compañerito de campo.

A las personas que me permitieron entrevistarlas, compartiéndome sus indispensables opiniones y conocimientos sobre el manejo de agua y áreas verdes en el campus.

A mis amistades que me ayudaron a muestrear: mis compis de francés, José, Isaí y Lucía, que se sentaron conmigo tantas tardes frente al infiltrómetro y cargaron mis garrafrones. Y, por supuesto, a Andrés, quien estuvo conmigo en las tomas de la zona cultural y ahora está conmigo siempre: no alcanzaste a ver este trabajo terminado, pero va por ti.

A Irene, por apoyarnos en los meses difíciles y por enseñarme un poquito de lo mucho que sabes.

A mi Pao y mi Julio, lucecitas en mi camino. Gracias por acompañarme y cuidarme siempre, salir adelante fue posible porque tengo a personas como ustedes en mi vida.

A mi familia: mi mamá, papá y hermana, por su ejemplo y apoyo incondicional. Pero también a mi familia ampliada, Ana, Pedro, Julia y Lucía, por el cariño y el acompañamiento.

A Nicolás, mi compañero de vida, por absolutamente todo: el apoyo, el amor incondicional, los consejos, la escucha continua y una infinidad de otras cosas. El camino siempre es más bonito y divertido cuando es contigo.

## *Índice general*

Índice de Tablas.....	3
Índice de Figuras.....	4
Acrónimos .....	5
Resumen .....	6
Abstract .....	7
1 Introducción .....	8
2 Planteamiento del proyecto .....	11
3 Marco teórico .....	13
3.1 Urbanización y agua .....	13
3.2 Ciclo Urbano del Agua .....	14
3.3 Áreas verdes urbanas .....	18
3.4 Escasez hídrica .....	19
3.5 Gestión Integrada del Agua .....	20
3.6 Soluciones basadas en la naturaleza .....	28
3.7 Universidades como laboratorios vivientes para la sostenibilidad .....	30
3.8 Agenda para la Sostenibilidad Universitaria .....	31
4 Metodología .....	33
4.1 Área de estudio .....	33
4.1.1 Ubicación geográfica y clima .....	33
4.1.2 Geología y vegetación .....	34
4.1.3 Hidrología .....	41
4.1.4 El Manejo del Agua en Ciudad Universitaria .....	42
4.2 Cartografía de Ciudad Universitaria: coberturas de superficie .....	51
4.2.1 Descripción de las coberturas .....	51
4.2.2 Mapeo de coberturas del suelo .....	52
4.3 Tasas de infiltración de agua en el campus .....	55
4.3.1 Selección de sitios .....	55
4.3.2 Instrumentación y medición .....	56
4.3.3 Procesamiento de datos .....	58
4.4 Precipitación .....	59
4.4.1 Medición .....	59
4.4.2 Procesamiento de datos .....	59

4.5	Entrevistas a actores clave .....	60
4.5.1	Selección de actores clave .....	60
4.5.2	Matriz de preguntas .....	61
5	Resultados y discusión .....	62
5.1	Cartografía de coberturas de suelo en Ciudad Universitaria .....	62
5.2	Infiltración en el campus .....	65
5.2.1	Infiltración contra precipitación .....	67
5.3	Perspectiva Institucional .....	71
5.4	Cerrando el Ciclo Urbano del Agua en Ciudad Universitaria .....	77
5.4.1	Componentes .....	77
5.5	¿Un cambio paradigmático? .....	80
5.5.1	Situación actual .....	80
5.5.2	Reflexiones .....	83
6	Conclusiones .....	89
	Referencias .....	90
	Anexos .....	98

## *Índice de Tablas*

<b>Tabla 1.</b> Objetivos generales, específicos y líneas estratégicas del PISU.....	31
<b>Tabla 2.</b> Características de las superficies infiltrantes de Ciudad Universitaria.....	40
<b>Tabla 3.</b> Características de los sectores hídricos de Ciudad Universitaria.....	43
<b>Tabla 4.</b> Información técnica sobre los pozos de extracción y tanques de almacenamiento.....	45
<b>Tabla 5.</b> Características de los tanques de almacenamiento.....	46
<b>Tabla 6.</b> Información de volúmenes de tratamiento de las PTAR del campus.....	49
<b>Tabla 7.</b> Actores claves entrevistados y sus respectivos cargos.....	60
<b>Tabla 8.</b> Área (m <sup>2</sup> ) ocupada por las coberturas de superficie identificadas y porcentaje de la superficie total que ocupan en Ciudad Universitaria.....	62
<b>Tabla 9.</b> Cambio en las coberturas (m <sup>2</sup> ) entre los años 2002 y 2022.....	62
<b>Tabla 10.</b> Resumen descriptivo de los valores de $K_{fs}$ .....	65
<b>Tabla 11.</b> Características de los eventos estudiados durante el período seleccionado.....	68
<b>Tabla 12.</b> Intensidades máximas y promedio de los eventos de precipitación analizados.....	68

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Umbrales descriptivos para la evaluación del ODS 6.5.1.....	25
<b>Figura 2.</b> Zonificación de Ciudad Universitaria.....	33
<b>Figura 3.</b> Extensión de las lavas del Xitle y ubicación de CU.....	35
<b>Figura 4.</b> <i>Echeveria gibbiflora</i> en colada de lava cubierta por líquenes.....	36
<b>Figura 5.</b> Cambio de la superficie de la REPSA a través del tiempo. ....	37
<b>Figura 6.</b> Coberturas de A: REPSA y B: superficies combinadas.....	38
<b>Figura 7.</b> Coberturas de A: superficie ajardinada y B: espacio deportivo .....	40
<b>Figura 8.</b> Ubicación de CU según cuenca y región hidrológico-administrativa .....	41
<b>Figura 9.</b> Sectores hídricos de Ciudad Universitaria.....	43
<b>Figura 10.</b> Ubicación de A: pozos de extracción y tanques de almacenamiento; B: plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). ....	45
<b>Figura 11.</b> Esquema de distribución entre pozos y tanques en CU.....	47
<b>Figura 12.</b> Importancia de la verificación en campo, donde A: imagen satelital y B: visita en campo del mismo sitio.....	55
<b>Figura 13.</b> Sitios de muestreo de $K_{fs}$ en el campus.....	56
<b>Figura 14.</b> Esquema del infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo.....	57
<b>Figura 15.</b> Pérdida de pedregales remanentes entre 2012 y 2022.....	63
<b>Figura 16.</b> Cartografía final de las coberturas de superficie en Ciudad Universitaria.....	64
<b>Figura 17.</b> Comportamiento de los datos de $K_{fs}$ obtenidos por categoría.....	65
<b>Figura 18.</b> Infiltración contra precipitación.....	69
<b>Figura 19.</b> Encharcamiento en la zona deportiva del casco central de Ciudad Universitaria.....	70
<b>Figura 20.</b> Componentes del Ciclo Urbano del Agua en Ciudad Universitaria.....	77

## *Acrónimos*

**AMCOW** African Minister's Council on Water

**CNDH** Comisión Nacional de los Derechos Humanos

**CONAGUA** Comisión Nacional del Agua

**CPI** City Prosperity Index (Índice de las Ciudades Prósperas, en español)

**CUA** Ciclo Urbano del Agua

**DGOC** Dirección General de Obras y Conservación

**DGCS** Dirección General de Comunicación Social

**EGIRH-X** Estrategia para la Gestión Integral del Recurso Hídrico - Xalapa

**GIA** Gestión Integrada del Agua

**GWP** Global Water Partnership

**ODS** Objetivos de Desarrollo Sostenible

**OOA** Organismo Operador del Agua

**PISU** Plan Integral para la Sustentabilidad desde la UNAM

**PUMAGUA** Programa de Manejo, Uso y Reuso del Agua en la UNAM

**REPSA** Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel

**SACMEX** Sistema de Aguas de la Ciudad de México

**ZMVM** Zona Metropolitana del Valle de México

## *Resumen*

El presente trabajo estudió el Ciclo Urbano del Agua en Ciudad Universitaria, UNAM, con el objetivo de generar información necesaria para la toma de decisiones hacia la incorporación de una Gestión Integrada del Agua. Para ello, se realizó una cartografía detallada de las coberturas del suelo ( $m^2$ ) del campus, distinguiendo entre áreas infiltrantes (áreas verdes y REPSA) y selladas (piso, estacionamiento y techo); se hicieron mediciones de conductividad hidráulica saturada en campo para conocer el potencial de infiltración del agua en áreas verdes; y se analizó la perspectiva institucional sobre el manejo de agua y áreas verdes. Los resultados mostraron que aproximadamente el 40% de la superficie está cubierta por áreas selladas y el resto por infiltrantes, con 33% por la REPSA y 27% por demás áreas verdes, incluyendo 3% de canchas deportivas. Asimismo, se estimó que la cobertura de áreas infiltrantes se ha perdido en un 10% anual desde el 2002. Las mediciones de conductividad hidráulica mostraron que las áreas verdes estudiadas tienen una tasa promedio de  $77 \text{ mm h}^{-1}$ , cerca de 3.5 veces menos que la tasa de  $275 \text{ mm h}^{-1}$  reportada en la REPSA. Por otro lado, la aplicación de entrevistas estructuradas a siete actores que son o han sido clave en el manejo del agua y áreas verdes del campus permitió identificar las fortalezas, debilidades y necesidades del Ciclo Urbano del Agua local. Entre las estrategias sugeridas para impulsar una Gestión Integrada del Agua están la creación de un organismo operador y la implementación de soluciones basadas en la naturaleza para aprovechar hasta  $4,162,780 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  de agua. Entre las conclusiones destaca la necesidad de un cambio paradigmático en el manejo del agua que permita hacer frente a la crisis climática actual, especialmente considerando el papel de Ciudad Universitaria como un laboratorio viviente para la sostenibilidad.

*Palabras clave: áreas verdes urbanas, gestión integrada del agua, soluciones basadas en la naturaleza, recarga de acuíferos, ciclo urbano del agua.*



## *Abstract*

The present study examined the Urban Water Cycle in Ciudad Universitaria, UNAM, with the aim of generating the necessary information for decision-making towards the incorporation of an Integrated Water Management. To achieve this, a detailed cartography of land covers ( $\text{m}^2$ ) on campus, distinguishing between infiltrating areas (green areas and REPSA) and sealed areas (road pavement, parking lots and roofs); saturated hydraulic conductivity measurements were taken in the field to understand water infiltration potential in green areas; and the institutional perspective on water and green areas management was also analyzed. The results showed that approximately 40% of the surface is covered by sealed areas, and the rest by infiltrating areas, with 33% being REPSA and 27% other green areas, including 3% of sports fields. Additionally, it was estimated that infiltrating area coverage has been lost by 10% annually since 2002. Hydraulic conductivity measurements indicated that the studied green areas have an average rate of  $77 \text{ mm h}^{-1}$ , nearly 3.5 times less than the rate of  $275 \text{ mm h}^{-1}$  reported in the REPSA. On the other hand, applying structured interviews to seven actors who are or have been key in water and green areas management on campus, allowed for identifying strengths, weaknesses, and needs of the local Urban Water Cycle. Among the suggested strategies to promote Integrated Water Management are the establishment of an operational entity and the implementation of nature-based solutions to harness up to  $4,162,780 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$  of water. One of the conclusions highlights the need for a paradigm shift in water management that addresses the current climate crisis, especially considering the role of Ciudad Universitaria as a living laboratory for sustainability.

*Keywords: urban green areas, integrated water resources management, nature-based solutions, aquifer recharge, urban water cycle.*

## 1 Introducción

El agua se encuentra en el centro de las discusiones sobre sostenibilidad, pero se convierte en un asunto marginal al trasladarse a las agendas políticas. Durante las últimas décadas, su disponibilidad en cantidad y calidad se ha visto cada vez más mermada, amenazando la vida y desarrollo no sólo de millones de personas, sino también de ecosistemas enteros (IPCC, 2023). Hay múltiples factores asociados a esta pérdida, entre ellos puede destacarse la tendencia global hacia la urbanización. Si bien las ciudades cubren cerca del 3% de la superficie terrestre, son responsables de entre el 60-80% del consumo mundial de energía, del 75% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de más del 75% del consumo de los bienes naturales (Swilling *et al.*, 2013; ONU, 2020). En este contexto, la demanda de agua ha aumentado en un 600% durante el último siglo y se estima que para el 2050 más del 50% de la población mundial vivirá en regiones con escasez hídrica (Boretti y Rosa, 2019).

Diversos autores han estudiado y descrito las modificaciones y la complejización del ciclo hidrológico y los balances de agua en las ciudades. De acuerdo con Marsalek *et al.* (2006) el ciclo hidrológico en las ciudades se ve fuertemente modificado por los impactos de la urbanización y la necesidad de proveer a la población los servicios relacionados con el agua (abastecimiento, drenaje, tratamiento, entre otros). Los autores aseguran que las interacciones entre ambientes urbanos, o el ciclo social del agua (Wei *et al.*, 2017) y el ciclo hidrológico, resultan en un ciclo más complejo al que se le puede llamar “Ciclo Urbano del Agua” (CUA). El entendimiento del CUA como un concepto aparte del ciclo hidrológico convencional, permite comprender la conectividad e interdependencia del agua en las ciudades y las actividades humanas.

Las principales modificaciones que acompañan a la urbanización son el aumento de las superficies impermeables y la expansión de las redes artificiales de drenaje (McGrane, 2015). Dicho aumento, además de deteriorar la calidad y las funciones ecosistémicas de los suelos, se caracteriza por impedir totalmente la infiltración del agua a capas más profundas y con ello la recarga de acuíferos. Lo anterior cobra importancia considerando que el 70% del agua utilizada para la industria, la agricultura y el consumo humano en el país, proviene de fuentes subterráneas (Cruz-Ayala y Megdal, 2020). La proporción es la misma cuando se habla de la Zona

Metropolitana del Valle de México (ZMVM), dependiente en un 71% del acuífero subyacente, del cual se extrae más agua de la que se infiltra anualmente (Canteiro *et al.*, 2018).

En aquellos espacios, generalmente ciudades y megaciudades, en donde gran porcentaje del suelo es impermeable, las áreas verdes urbanas cobran una importancia extraordinaria. Se ha demostrado que estos espacios llevan a cabo diversas funciones críticas que benefician la calidad de vida de sus habitantes humanos y no humanos, proveyendo beneficios ecológicos, económicos y sociales (Heidt y Neef, 2007). Se identifican, por ejemplo, la recarga de acuíferos, la regulación del clima, la provisión de hábitat, la reducción del efecto isla de calor e incluso la definición de la estructura e identidad de las ciudades por sus funciones sociales y estéticas (Heidt y Neef, 2007). Con el crecimiento de la traza urbana de la ZMVM, cada vez se ejerce una mayor presión sobre el suelo de conservación y, de igual modo, sobre sus áreas verdes urbanas.

Al sur de la Ciudad de México, en la alcaldía Coyoacán, se encuentra la Ciudad Universitaria (CU), campus central de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Además de albergar múltiples áreas verdes urbanas distribuidas en jardines, camellones y canchas deportivas, cuenta con un área verde fundamental para la zona: la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA). De acuerdo con Canteiro (2021), ésta es uno de los últimos sitios de recarga para el acuífero somero que alimenta un gran porcentaje de los habitantes de la zona sur de la Ciudad. Por ello, su conservación y sus propiedades físicas “promueven la provisión de servicios ecosistémicos de regulación de la cantidad y calidad del agua subterránea en el acuífero somero” (Canteiro, 2021: 90). Sin embargo, al igual que en el resto de las ciudades, las áreas verdes de CU (incluyendo la REPSA) se encuentran bajo la constante amenaza del sellamiento de superficies y expansión del suelo urbano, amenazando, entre otras cosas, la seguridad hídrica de la zona.

Ante el panorama actual de escasez hídrica que amenaza la seguridad y sostenibilidad de los centros urbanos y de ecosistemas enteros, han surgido diversas propuestas en búsqueda de soluciones efectivas; tal es el caso de la Gestión Integrada del Agua (GIA). La GIA se plantea como una herramienta que promueve el desarrollo y la gestión coordinada del agua, la tierra y demás bienes naturales relacionados, con la finalidad de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (GWP,

2004). Su funcionalidad ha sido demostrada a través de múltiples casos de éxito en diferentes contextos culturales, sociales, ambientales y económicos. Sin embargo, su correcta implementación requiere forzosamente del compromiso e involucramiento no solo a nivel gobierno y tomadores de decisiones, sino también de la población en general y académica. Así, aunque existen casos exitosos en México, su implementación puede ser, sin duda, bastante compleja.

En respuesta a lo anterior, desde hace un par de décadas se ha impulsado la idea de considerar a los campus universitarios, particularmente las macro-universidades, como *laboratorios vivientes para la sostenibilidad* (Lindstrom y Middlecamp, 2017). Como describen Verhoef y Bossert (2019), al estar inmersas en dinámicas dentro de ciudades y al mismo tiempo tener sus propias dinámicas internas, son parte de sistemas urbanos complejos, pudiendo actuar simultáneamente en diversos niveles: ser un ejemplo junto con sus tomadores(as) de decisiones a nivel de gobiernos locales y regionales; movilizar o fomentar soluciones transdisciplinarias; y formar a los y las estudiantes como posibles futuros líderes en el campo de la sostenibilidad, además de promover su proactividad.

En este sentido, Ciudad Universitaria tiene un papel particularmente importante por su potencial de incidencia en el desarrollo sostenible del país. Dadas sus dimensiones y su tamaño poblacional, funciona como un laboratorio viviente para la sostenibilidad en donde es posible estudiar alternativas novedosas y soluciones que más adelante podrán replicarse en el resto de ciudades pequeñas y medias del país. Así, considerando todo lo anterior, entender el manejo del agua en CU a través de una visión integral, es decir, su Ciclo Urbano del Agua, puede establecer las pautas para una futura implementación de una Gestión Integrada del Agua en el campus. Lo anterior, además, permitiría el cumplimiento de la agenda universitaria para la sostenibilidad, fortaleciendo el camino en la búsqueda de la seguridad hídrica en la zona.

## 2 *Planteamiento del proyecto*

Ciudad Universitaria juega un papel fundamental en el desarrollo sostenible en el país y puede funcionar como un laboratorio viviente para la sostenibilidad. Además, su tamaño poblacional es equivalente al de una ciudad media, por lo que sirve de ejemplo para el grueso de las ciudades mexicanas<sup>1</sup>.

Si bien el campus ya se encuentra en una transición hacia la sostenibilidad, aún tiene muchos retos por resolver (Oyama *et al.*, 2018). En materia del agua, conocer a profundidad el Ciclo Urbano del Agua en el campus permitiría identificar fortalezas, debilidades y establecer posibles soluciones y alternativas que impulsen dicha transición. Por ejemplo, se conoce la importancia de la reserva ecológica que alberga (la REPSA) y los volúmenes de agua que puede infiltrar anualmente, sin embargo, aún no existe un cálculo o estimación equivalente para el resto de sus áreas verdes. Tampoco se cuenta con una cartografía detallada que cuantifique las diferentes coberturas de suelo que hay en el campus; información que permite estimar la pérdida o permanencia de sus áreas verdes, así como localizar los posibles sitios para implementar soluciones.

Así, estudiar este tema desde las Ciencias de la Sostenibilidad es fundamental para entender un poco de su complejidad: analizar el funcionamiento operacional y biofísico permite acercarse al “cómo” y conocer la perspectiva institucional a través de las opiniones de agentes clave al “porqué”. Partiendo de lo anterior, las preguntas de investigación, la hipótesis y los objetivos planteados se describen a continuación.

### *Pregunta general de investigación*

¿De qué manera conocer el Ciclo Urbano del Agua en Ciudad Universitaria puede permitir la incorporación de una Gestión Integrada del Agua en el campus?

---

<sup>1</sup> De acuerdo con cifras del INEGI (2018), 364 de los 401 asentamientos urbanos de México corresponden a ciudades medias, pequeñas y centros urbanos.

### *Preguntas particulares de investigación*

- ¿Cómo es el Ciclo Urbano del Agua en Ciudad Universitaria?
- ¿Qué superficie del campus está cubierta por áreas infiltrantes? ¿y por áreas selladas?
- ¿Cuál es la perspectiva institucional sobre el manejo del agua y las áreas verdes en el campus?
- ¿Qué tipo de estrategias pueden implementarse en Ciudad Universitaria para tener una Gestión Integrada del Agua?

### *Hipótesis*

El entendimiento del Ciclo Urbano del Agua de Ciudad Universitaria, considerando sus componentes sociales, operacionales y biofísicos, permitiría establecer las pautas para incorporar una Gestión Integrada del Agua en el campus. Así, si se entiende y conoce este ciclo, entonces será posible proponer estrategias que permitan avanzar hacia una Gestión Integrada del Agua en el campus.

### *Objetivo general*

Entender el Ciclo Urbano del Agua en Ciudad Universitaria, UNAM, para establecer las pautas que permitan la incorporación de una Gestión Integrada del Agua.

### *Objetivos particulares*

- Describir el Ciclo Urbano del Agua de Ciudad Universitaria.
- Elaborar una cartografía detallada de las coberturas del suelo en Ciudad Universitaria, distinguiendo entre áreas infiltrantes y selladas al agua.
- Conocer la perspectiva institucional sobre el manejo del agua y áreas verdes en el campus.
- Proponer estrategias para impulsar una Gestión Integrada del Agua en el campus.

### 3 Marco teórico

#### 3.1 Urbanización y agua

Los siglos XX y XXI se han caracterizado por una tendencia global hacia la urbanización. Si bien las concentraciones urbanas facilitan el suministro de servicios, a medida que crecen también aumenta el costo para satisfacer sus necesidades, ejerciendo una mayor presión sobre el medio ambiente y los bienes naturales. A pesar de que las ciudades cubren cerca del 3% de la superficie terrestre, son responsables de entre el 60-80% del consumo mundial de energía, del 75% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de más del 75% del consumo de los bienes naturales (Swilling *et al.*, 2013; ONU, 2020). Por ejemplo, la demanda de agua ha aumentado en un 600% durante el último siglo y se estima que para el 2050 más del 50% de la población mundial vivirá en regiones con escasez hídrica (Boretti y Rosa, 2019).

Uttara *et al.* (2021) identifican múltiples impactos ambientales asociados a este proceso: en términos atmosféricos, la creación de islas de calor, la contaminación del aire y los cambios en los patrones de precipitación; para el suelo se encuentran sellamiento, contaminación y pérdida de calidad; y para la biósfera, la modificación y destrucción de hábitats, ocasionando pérdida de riqueza y diversidad.

En cuanto al agua, diversos autores han estudiado y descrito las modificaciones y la complejización del ciclo hidrológico y los balances de agua, resultando en un ciclo más complejo nombrado “Ciclo Urbano del Agua”, explicado más adelante. Las principales modificaciones que acompañan a la urbanización son el aumento de las superficies impermeables y la expansión de las redes artificiales de drenaje (McGrane, 2015). Dichas modificaciones ocasionan deterioro en el control del escurrimiento superficial, aumentando sus volúmenes y reduciendo los tiempos de retraso, lo que se traduce en inundaciones y descargas máximas durante las tormentas; disminución en la evapotranspiración, alterando la regulación climática; cambios en las dinámicas subsuperficiales, con disminución en la recarga de acuíferos y su contaminación por la calidad de las aguas que se arrastran; cambios en la intensidad y variabilidad de la precipitación, incluso a escalas regionales; y contaminación de cuerpos de agua receptores y ecosistemas

acuáticos debido a la ausencia del tratamiento adecuado de las aguas residuales (Haase, 2009; McGrane, 2015; IPCC, 2023).

### 3.2 *Ciclo Urbano del Agua*

De acuerdo con Marsalek *et al.* (2006), el ciclo hidrológico en las ciudades se ve fuertemente modificado por los impactos de la urbanización y la necesidad de proveer a la población los servicios relacionados al agua (abastecimiento, drenaje, tratamiento, entre otros). Los autores aseguran que las interacciones entre ambientes urbanos, o el ciclo social del agua (Wei *et al.*, 2017), y el ciclo hidrológico resultan en un ciclo más complejo al que se le puede llamar “Ciclo Urbano del Agua” (CUA). Por lo anterior, entender al CUA como un concepto aparte del ciclo hidrológico convencional, permite comprender la conectividad e interdependencia del agua en las ciudades y las actividades humanas.

El concepto del CUA busca abordar las dimensiones climáticas, hidrológicas, de uso de suelo, ingenieriles, culturales y ecológicas de las áreas urbanas. Así, considera no sólo los componentes básicos del ciclo hidrológico (precipitación, interceptación, infiltración, evaporación...), sino que también toma en cuenta la parte operacional del manejo del agua: obtención, distribución, tratamiento y disposición (Marsalek *et al.* 2006; Wei *et al.*, 2017). Además, resalta a la cultura como un aspecto fundamental, existiendo dos impactos directos derivados de ésta: la arquitectura, que explica desde la densidad de edificios hasta los materiales de construcción, y los estilos de vida de las personas, que se traducen en la demanda doméstica (Marsalek *et al.*, 2006).

Sin embargo, el concepto es frecuentemente simplificado, tal como puede verse en Bañuelos (2021, p.3), quien lo describe como “todas las acciones requeridas para suministrar agua de calidad potable a una comunidad, independientemente de sus dimensiones, asegurando que la recolección del agua residual, su tratamiento y retorno al cuerpo receptor no deteriore su calidad”. Así, para fines de este proyecto, se considerará la primera y más extensa definición del CUA, tomándolo como la combinación de procesos naturales del ciclo hidrológico y procesos operacionales e ingenieriles del agua, es decir, abastecimiento, uso y saneamiento. A continuación, se definirán sus componentes principales para tener una mayor comprensión.



### *Componentes principales*

Como se mencionó previamente, el ciclo hidrológico cambia como resultado de la urbanización y los procesos que ocurren dentro de las ciudades: por ejemplo, el sellamiento de los suelos no solo impide o dificulta la infiltración del agua, también cambia la absorción de los flujos radiativos y con esto las cantidades de precipitación, evaporación y evapotranspiración (Marsalek *et al.*, 2006; McGrane, 2015). Por ello, el ciclo hidrológico tradicional de “*precipitación → infiltración/escurrecimiento → cuerpo de agua → evaporación*” sólo aplica en ciertas áreas y en el resto se entrelaza con el ciclo social de “*abastecimiento → transporte/almacenamiento → uso → drenaje → tratamiento → descarga*” (Wei *et al.*, 2017), siendo la penúltima etapa más ideal que usual. Así, el CUA en realidad está sujeto a la interacción, transformación e influencia de fuerzas naturales y fuerzas antrópicas (Wei *et al.*, 2017), teniendo una combinación de componentes principales que serán descritos a continuación, tomando como base la identificación de componentes realizada por Marsalek *et al.* (2006).

### *Fuentes de agua*

Se identifican dos fuentes principales de agua: la *precipitación* y el *suministro municipal*. La precipitación dependerá de los factores climáticos de cada ciudad, aunque cada vez hay más evidencia de la generación microclimas y cambios en la precipitación asociados a las zonas urbanas (IPCC, 2023). Además, tiene un papel fundamental en el mantenimiento de las áreas verdes urbanas, como los bosques urbanos y periurbanos. Por otro lado, el suministro municipal busca cubrir la demanda poblacional, frecuentemente importando agua de otras cuencas o extrayéndola de fuentes subterráneas. Su funcionamiento depende del correcto estado y operación de la infraestructura asociada.

### *Abstracciones hidrológicas*

La reducción de procesos como la interceptación, la evaporación y la transpiración, también conocidas como “abstracciones hidrológicas”, y el incremento del escurrecimiento superficial, son impactos comúnmente asociados a la urbanización (Leopold, 1968, como se citó en Marsalek *et al.*, 2006). Debido al sellamiento de superficies en las zonas urbanas, la infiltración de agua de

lluvia se reduce y en su lugar se produce escurrimiento superficial; este escurrimiento incrementa el riesgo de inundaciones, erosión y contaminación de cuerpos receptores, al contaminarse en su camino y/o combinarse con el drenaje. A continuación se enlistan y describen brevemente las abstracciones hidrológicas características del CUA:

- *Intercepción:* porción de la precipitación que queda almacenada en el dosel de la vegetación o superficie, evaporándose durante y/o al término de la lluvia. En las áreas urbanas cuya cobertura vegetal es escasa, este componente es insignificante y frecuentemente no considerado en los balances hídricos.
- *Almacenamiento en depresiones:* agua que es retenida en pequeñas depresiones de la superficie hasta que se infiltra o evapora.
- *Evapotranspiración:* procesos relacionados con la transformación del agua de su forma líquida a su forma gaseosa, reincorporándose a la atmósfera. Esta transformación ocurre en las interfases agua-aire, suelo-aire y suelo-vegetación-aire. En el CUA la evapotranspiración (ET) engloba la evaporación del suelo, la transpiración de las plantas, la evaporación de las superficies selladas y la evaporación de los cuerpos de agua (Chen *et al.*, 2022). Aunque son componentes importantes del ciclo hidrológico, en el CUA se reducen por la pérdida de vegetación y suelos permeables y con ello la reducción del calor latente (Mazrooei *et al.*, 2021). Su reducción favorece el aumento de la temperatura en las ciudades (Chen *et al.*, 2022).
- *Infiltración:* proceso en el que el agua ingresa al suelo en sus primeras capas (0 a 10 cm) debido a fuerzas de gravedad y capilaridad. La infiltración es un proceso hidrológico fundamental para la recarga de acuíferos someros y el almacenamiento de agua en suelos, factor determinante para el crecimiento de plantas y la supervivencia de organismos del suelo (USDA, 2008). Las tasas de infiltración se reducen dramáticamente en las ciudades como resultado del aumento de superficies selladas, la compactación de los suelos urbanos y la presencia de infraestructura de drenaje que retira rápidamente el agua (Masarlek *et al.*, 2006).

### *Almacenamiento del agua*

Como se mencionó previamente, la infiltración contribuye a la humedad o almacenamiento de agua de los suelos y a la recarga de acuíferos. En el CUA se observa que:

- *Humedad en el suelo:* afectada no sólo por el sellamiento de suelos, que evita la infiltración, sino también por la modificación de las características y estructura de los suelos durante el cambio de uso de suelo y las etapas de construcción. Esta modificación se traduce frecuentemente en baja porosidad y alta compactación, que a su vez reducen la capacidad de almacenamiento de agua en la matriz del suelo..
- *Aguas subsuperficiales urbanas:* afectadas en cantidad y en calidad por los motivos previamente señalados.

### *Escurrimiento de aguas pluviales*

Uno de los componentes más alterados, siendo afectado por tres principales motivos: volúmenes mayores de agua como resultado de la disminución de infiltración y evapotranspiración; velocidades mayores por las mejoras hidráulicas en los canales de descarga y conducción; y aumento en los picos de descarga por la reducción en los tiempos de respuesta de la cuenca (Marsalek *et al.*, 2006).

### *Sumideros*

El último componente del CUA corresponde a los sumideros o bien, los cuerpos de agua receptores. Estos pueden ser superficiales (ríos, lagos, arroyos urbanos) o subsuperficiales (acuíferos). Sus usos y beneficios van desde el almacenamiento y provisión, hasta el transporte y el esparcimiento. Sin embargo, un uso frecuente, sobre todo en los arroyos urbanos, es el de drenaje o transporte de aguas negras o grises. De hecho, en el diseño urbano son frecuentemente modificados para satisfacer las demandas de desagüe, entubándolos o cambiando su curso. Este uso compromete su calidad y amenaza la seguridad de los ecosistemas, cuencas y poblaciones que conviven con o dependen de ellos.

### 3.3 *Áreas verdes urbanas*

El crecimiento y expansión de las ciudades va en la mayoría de las veces acompañado por procesos de reducción, fragmentación y/o degradación de las áreas naturales y verdes, lo que provoca pérdida de conectividad ecológica, disminución de infiltración de agua a acuíferos subterráneos, desecación de cuerpos de agua y otras alteraciones de procesos y ciclos naturales (Oliva, 2020). Como consecuencia, los ecosistemas urbanos son frecuentemente frágiles, vulnerables y poco sostenibles. Cada vez se reconoce más la importancia de los espacios verdes urbanos, pues llevan a cabo diversas funciones críticas que benefician la calidad de vida de sus habitantes humanos y no humanos, proveyendo beneficios ecológicos, económicos y sociales (Heidt y Neef, 2007). Se identifican, por ejemplo, la regulación del clima, la provisión de hábitat, la reducción del efecto isla de calor e incluso la definición de la estructura e identidad de las ciudades por sus funciones sociales y estéticas (Heidt y Neef, 2007).

Con el crecimiento de la traza urbana de la Zona Metropolitana del Valle de México, cada vez se ejerce una mayor presión sobre el suelo de conservación y, de igual modo, sobre las áreas verdes dentro de la aglomeración, incluyendo las aún conservadas. Alrededor de la desaparición de espacios verdes también existe un componente de injusticia social, pues el acceso que tienen las personas a estos espacios es especialmente inequitativo; contando con mayor presencia en áreas centrales y con altos niveles socioeconómicos, contrario a aquellas en colonias populares o zonas periféricas (ONU-Habitat, 2018). De acuerdo con el informe de CPI extendido de ONU-Habitat (2018), la ZMVM cuenta con 7.8 m<sup>2</sup> de áreas verdes por habitante, sin embargo, en alcaldías como Miguel Hidalgo se registran en promedio 31 m<sup>2</sup>/hab, mientras que en Iztapalapa se reportan apenas 4 m<sup>2</sup>.

Por todo lo mencionado anteriormente, procurar las áreas verdes que aún existen en la CDMX y su aglomeración urbana es fundamental para mejorar la calidad de vida de las personas y asegurar los beneficios y funciones ecológicas que derivan de ellas.

### 3.4 Escasez hídrica

De acuerdo con la ONU (s.f.), la escasez hídrica es el punto en el que el impacto y consumo de todos los usuarios<sup>2</sup> afectan al suministro o calidad del agua, ocasionando que la demanda de todos los sectores (incluyendo el ambiental) no pueda ser satisfecha. Es un concepto relativo pues se estima según la disponibilidad de agua y la población de algún lugar: valores mayores a 1,700 m<sup>3</sup> anuales por persona se consideran los “recomendados”; cuando el suministro es igual o menor a 1,700 m<sup>3</sup> anuales por persona, se habla de estrés hídrico; si este disminuye a 1,000 m<sup>3</sup>, se cataloga como escasez hídrica; por último, si cae debajo de 500 m<sup>3</sup> se trata de escasez hídrica absoluta. Algunas de las razones por las que puede haber escasez hídrica son que la demanda supere la oferta, la existencia de infraestructura hídrica inadecuada o la incapacidad institucional para equilibrar las necesidades de todos los sectores (ONU-Agua, s.f.).

México presenta múltiples brechas de desigualdad en el acceso al agua en el interior de sus ciudades: se estima que 10% de la población en México no tiene acceso al agua potable (Gaceta UNAM, 2019) y tan sólo en la Ciudad de México, el 70% de sus habitantes no tienen un servicio regular de agua, recibiendo menos de 12 horas de agua continua diariamente (Rodríguez, 2018). Sin embargo, el acceso al agua en cantidad y calidad no es el único problema a combatir: la sobreexplotación de acuíferos en el país, el crecimiento poblacional desmedido y el cambio de uso de suelo, lo han llevado a un estado de escasez hídrica que amenaza su sostenibilidad.

Según Cruz-Ayala y Megdal (2020), 100 de los 188 acuíferos más importantes destinados a la agricultura y el consumo humano están sobreexplotados en el país y 32 han sido afectados por intrusión salina en las zonas costeras. Estos números se vuelven más alarmantes al resaltar que el 70% del agua utilizada para la industria, la agricultura y el consumo humano en el país, proviene de fuentes subterráneas. La proporción es la misma cuando se habla de la Zona Metropolitana del Valle de México, dependiente en un 71% del acuífero subyacente, del cual se extrae más agua de la que se infiltra anualmente (Canteiro *et al.*, 2018). Esta sobreexplotación es responsable de la subsidencia que se vive en múltiples zonas de la ciudad, aumentando su vulnerabilidad ante terremotos. Lo anterior hace evidente que, como menciona Zambrano (2019), la falta de interés

---

<sup>2</sup> En México, la CONAGUA identifica los siguientes usuarios: sector agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida, termoeléctricas, hidroeléctricas y conservación ecológica (Gobierno de México, 2019).

por entender el funcionamiento natural de la cuenca, se ha reflejado en el manejo poco eficiente del agua en las ciudades.

De acuerdo con ONU-Agua (s.f.), una manera de enfrentarse a la escasez hídrica es mediante un enfoque de Gestión Integrada del Agua (GIA), entendiendo al agua como un bien escaso y considerando los usos y necesidades de todos los usuarios, incluyendo a todos los seres vivos. Además, aseguran que para ello es fundamental contar con datos de buena calidad y sistemas de monitoreo que permitan conocer a mayor profundidad las dinámicas hidrológicas a niveles de cuenca y regionales. Por último, resaltan que las fuentes de agua subterráneas son parte de la solución, por lo que conocerlas, protegerlas y utilizarlas de manera sostenible es fundamental.

### 3.5 *Gestión Integrada del Agua*

Si bien el agua es un elemento crítico en el desarrollo sostenible, a menudo es pasada por alto en la toma de decisiones y en la aplicación de planes y proyectos. Es esencial para la erradicación de la pobreza y se encuentra directamente relacionada con la salud, la agricultura, la energía y la biodiversidad; es por ello que sin una buena gestión del agua, será imposible cumplir no sólo con los objetivos de Desarrollo Sostenible al 2030 establecidas por las Naciones Unidas, sino también con los planes y programas a los diferentes niveles de gobierno en nuestro país.

Al igual que muchos otros conceptos y propuestas de la esfera ambiental, en la década de los años 90 surgió el concepto de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (*Integrated Water Resources Management*, IWRM en inglés), que para este trabajo se le denominará Gestión Integrada del Agua (GIA). La GIA no es una meta, es una herramienta para abordar desafíos relacionados con el agua y optimizar su contribución al desarrollo sostenible. De acuerdo con el GWP (2004), promueve el desarrollo y la gestión coordinados del agua, la tierra y demás bienes naturales relacionados, con la finalidad de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales. Esto incluye: suelos y agua; aguas superficiales y subterráneas; las cuencas y sus ambientes adyacentes costeros y marinos; y los intereses de los usuarios a lo largo de los cauces (río arriba y río abajo).

Sin embargo, no se trata únicamente de la gestión de bienes físicos: también busca reformar sistemas humanos para permitir que las personas puedan beneficiarse de ellos, es decir, el agua debe tener un lugar apropiado en las agendas políticas, creando y promoviendo canales de comunicación y toma de decisión conjunta entre gobiernos, organizaciones, grupos de interés y comunidades (GWP, 2004). Para ello, la formulación de políticas y la planificación bajo este enfoque requiere: 1) que las políticas tomen en cuenta las implicaciones del agua, es decir, su desarrollo, gestión y uso; 2) que haya una integración intersectorial en el desarrollo de políticas, promoviendo y asegurando la participación de mujeres y personas en situación de precariedad económica; 3) que las decisiones a escalas locales o de cuenca estén alineadas o no entren en conflicto con el cumplimiento de objetivos nacionales más amplios; y 4) que la planificación y las estrategias elegidas se integren en objetivos sociales, económicos y ambientales más amplios (niveles nacionales e internacionales).

De acuerdo con Savenije y Van der Zaag (2008), existen dos cuestiones primordiales que intersectan la GIA: la sostenibilidad y el interés público. La primera se refiere al mantenimiento de la calidad ambiental, a la sostenibilidad financiera (hablando de la recuperación de costos), a la buena gobernabilidad o gobernanza y a la capacidad institucional, es decir, al desarrollo de capacidades, recursos humanos, instrumentos de gestión, políticas y marcos legales. La segunda hace referencia a la equidad (derecho básico de acceso de las personas al agua), el alivio de la pobreza, el género (teniendo el papel central las mujeres), la seguridad (protección contra inundaciones y sequías), la seguridad alimentaria y la salud.

Por otro lado, para poder utilizarse como una herramienta para el cambio, el GWP (2004) insiste que la GIA debe ser vista como un proceso a largo plazo, progresivo e iterativo. De este modo, debe responder al cambio y tener capacidad de adaptarse a nuevas condiciones económicas, sociales y ambientales y a los valores humanos cambiantes. Es importante resaltar que integrar este enfoque no significa desechar lo ya realizado y empezar de cero, sino adaptarse y construir sobre las instituciones y los procedimientos de planificación ya existentes para lograr un enfoque integrado.

Las ventajas de incorporar este enfoque incluyen: facilitar la solución de problemas, al tener una perspectiva multisectorial que permite identificar e implementar soluciones efectivas; evitar pérdidas relacionadas al desarrollo in-sostenible y los costos de la reparación de daño (que, por cierto, en México pocas veces son cubiertos); inversiones en infraestructura más costo-efectivas, al posibilitar la capitalización de posibles sinergias en los sistemas; y la asignación estratégica del agua, esto es, promueve la cooperación intersectorial y la alineación con objetivos más amplios de la sociedad.

### *Principios básicos*

La GIA pretende considerarse un enfoque flexible y no un marco dogmático, por lo que en lugar de tener reglas, está basada en los principios de Dublín. Estos principios surgieron durante la Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente de Dublín, Irlanda, en 1992 y establecen que:

1. El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, imprescindible para sustentar la vida. Una gestión eficaz exige un enfoque holístico que vincule el desarrollo social y económico con la protección de los ecosistemas naturales.
2. El desarrollo y la gestión del agua deben basarse en enfoques participativos que involucren usuarios, planificadores y tomadores de decisiones en todos los niveles, procurando que las decisiones se tomen al nivel apropiado más bajo, con plena consulta pública y participación de los usuarios en la planificación e implementación de proyectos hídricos.
3. Las mujeres juegan un papel central en la provisión, gestión y cuidado del agua. La aceptación e implementación de este principio requiere políticas que aborden las necesidades específicas de las mujeres para su equipamiento y empoderamiento hacia la participación en todos los niveles de los programas relacionados, incluyendo la toma de decisiones y la implementación.
4. El agua tiene un valor económico en todos sus usos, por lo que debe ser reconocida como un bien económico. Esta aseveración permite un manejo eficiente y equitativo, además de impulsar su conservación y protección.



## *El papel de la Eficiencia Hídrica*

La eficiencia hídrica es la capacidad de optimizar el uso de agua para satisfacer las necesidades humanas sin amenazar su sostenibilidad, maximizando los beneficios obtenidos a partir de su uso mientras se minimizan las pérdidas y desperdicios (Horne *et al.*, 2018). Su uso implica gestionar el agua eficaz y responsablemente a través de tecnologías, prácticas y políticas, por ejemplo: implementando sistemas de riego automatizados en la agricultura, impulsando la reutilización y reciclaje del agua en la industria o en los hogares y promoviendo prácticas conscientes del consumo del agua (Tzanakakis *et al.*, 2020). Es especialmente necesaria en lugares donde hay escasez hídrica o las presiones y demandas son crecientes (como las megaciudades).

Para lograr la eficiencia hídrica es necesario tener una gestión integrada que implique aspectos sociales, económicos y ambientales en la planificación y toma de decisiones relacionadas con el agua. En este sentido, existen dos objetivos clave para la GIA: alcanzar la eficiencia técnica (intervenciones de manejo) y, simultáneamente, alcanzar la eficiencia de asignación o asignativa (estrategias)(GWP, 2004). Ambas eficiencias requieren reconocer el valor social, ambiental y económico del agua, además, son complementarias y frecuentemente interdependientes.

La *eficiencia técnica* se centra en el manejo del agua y sus procesos, es decir, busca minimizar las pérdidas y el desperdicio durante el suministro de agua (obtención, distribución, uso). Sugiere la implementación de campañas informativas, incentivos económicos y avances tecnológicos. Hace especial énfasis en el reciclaje y reúso del agua, procurando a toda costa la eliminación de riesgos a la salud humana y ambiental, y en el mantenimiento, innovación o reforma de la infraestructura. Por otro lado, la *eficiencia de asignación* procura la optimización de la asignación y distribución del agua entre los usos y usuarios que compiten por ella, buscando que sea equitativa según las demandas y necesidades. Se alcanza a través de diversas medidas que garanticen la asignación a los usos de mayor valor, ya sea por mercados de agua, derechos de agua, sistemas u otros mecanismos económicos o reglamentarios, así como a través de una evaluación adecuada y realista de costo-beneficio.

## *Seguridad Hídrica*

La Seguridad Hídrica (SH) se refiere a la capacidad de una población para salvaguardar el acceso suficiente, seguro y asequible al agua para el bienestar humano, el desarrollo socioeconómico y la sustentabilidad de los ecosistemas. Grey y Sadoff (2007) añaden que lo anterior tiene que ir de la mano con un nivel aceptable de riesgos relacionados con el agua para las personas, los entornos y las economías, pues independientemente de lo que se haga para alcanzar la seguridad hídrica, los riesgos seguirán existiendo.

De acuerdo con GWP (2014), el concepto está directamente alineado con el de GIA pues todos los principios de ésta se encuentran embebidos en el concepto de la SH. Dicho de otro modo, la GIA abarca una parte integral e importante de la trayectoria hacia lograr o incrementar la SH: al implementar una GIA se promueven prácticas de conservación y manejo eficiente del agua, protección de los ecosistemas, participación de la sociedad y planificación integrada. Todas las acciones anteriores contribuyen a garantizar la SH a largo plazo, es decir, la SH es una de las metas o resultados de la correcta GIA.

Es importante aclarar que la seguridad hídrica absoluta no es alcanzable debido a las condiciones cambiantes a las que nos enfrentamos (social y ambientalmente). Es por esto que resalta la importancia de usar un enfoque que esté pensado en el cambio, que sea iterativo y progresivo.

Savenije y Van der Zaag (2008) describen que en un contexto de GIA, fortalecer o alcanzar la SH requiere de lo siguiente:

- Cubrir necesidades básicas: reconocer como derechos el acceso a agua en cantidad y calidad y su saneamiento.
- Proteger ecosistemas: garantizar la integridad de los ecosistemas a través de la gestión sostenible del agua, asegurando sus caudales ecológicos.
- Compartir recursos hídricos: promover la cooperación pacífica y desarrollar sinergias entre los diferentes usos del agua a todos los niveles, incluso en y entre los países.
- Gestión de riesgos: proporcionar seguridad contra inundaciones, sequías, contaminación y otros peligros relacionados con el agua.

- Valorizar el agua: gestionar el agua de tal modo que se reflejen sus valores económicos, sociales, ambientales y culturales para todos los usos. Incluso, cobrar o aumentar el cobro de los servicios hídricos para reflejar el costo real de su provisión.
- Gobernar el agua sabiamente: asegurarse que las necesidades del público y los intereses de los tomadores de decisiones sean incluidos en la gestión del agua.

### Ejemplos de Implementación

En 2018 se publicó un estudio de Bertule *et al.* en donde se realizó una evaluación de la implementación de la GIA en los diferentes países que firmaron la Agenda 2030, utilizando una serie de indicadores para medir el ODS 6.5.1 (implementación de GIA a todos los niveles, incluyendo cooperación transfronteriza). La evaluación se realizó entre 2017 y 2018 a 172 de los 193 países con un cuestionario de 33 preguntas que buscaban evaluar diferentes aspectos de la implementación. El puntaje global fue de 49, siendo LATAM y el Caribe la región con el puntaje más bajo (35) y Australia y Nueva Zelanda la región con el más alto (72). En la Figura 1 se puede ver qué simboliza cada puntaje. Además de evaluar la implementación, este análisis permitió identificar áreas a fortalecer y limitaciones del enfoque.

Puntaje	Muy bajo 0 - 10	Bajo 11 - 30	Medio-bajo 31 - 50	Medio-alto 51 - 70	Alto 71 - 90	Muy alto 91 - 100
	Desarrollo de elementos de GIA generalmente no ha comenzado, o se ha estancado.	Implementación de elementos de GIA generalmente ha comenzado, pero con una adopción limitada en todo el país y posiblemente baja participación de grupos de interesados.	Elementos de GIA generalmente están institucionalizados y la implementación está en marcha.	La capacidad para implementar elementos de GIA generalmente es adecuada y los elementos se están implementando en programas a largo plazo.	Los objetivos de GIA de planes y programas generalmente se cumplen y la cobertura geográfica y la participación de los interesados es generalmente buena.	La gran mayoría de los elementos de GIA se implementan completamente, se logran consistentemente los objetivos y los planes y programas se evalúan y revisan periódicamente.

**Figura 1.** Umbrales descriptivos para la evaluación del ODS 6.5.1. Adaptada de Bertule *et al.* (2018)

Hay múltiples publicaciones que demuestran la naturaleza iterativa y la necesidad de una revisión constante de la implementación de la GIA: Ibisch *et al.* (2016) hicieron un meta análisis de motivaciones, enfoques e implementación de 14 proyectos de GIA en el mundo para resaltar los principales obstáculos y áreas a fortalecer de la GIA; Karthe *et al.* (2016), Ngene *et al.* (2021) y

Cacal *et al.* (2023) hicieron revisiones de la implementación y propuestas de fortalecimiento para la cuenca de Kharaa en Mongolia, Nigeria y algunas áreas de Palawan, Filipinas, respectivamente.

Ejemplos de ambientes efectivos para la implementación de la GIA son Burkina Faso y Zimbabwe, en África. Ambos países tienen legislaciones sólidas en materia de agua y en 2015 aprobaron políticas y leyes formuladas utilizando los principios de la GIA. Además, estrategias y planes de GIA también se han implementado a niveles subnacionales y nacionales para cuencas compartidas (AMCOW, 2018).

Existen múltiples ejemplos de implementación y de evaluación, cada uno con sus particularidades y logros. Cada uno de ellos demuestra que el enfoque de la GIA puede ser efectivo para abordar diversos desafíos relacionados con el agua y lograr resultados positivos, sin embargo, el recordar que es un enfoque progresivo e iterativo es fundamental.

### *Implementación en México*

Existen algunos casos de implementación de GIA en nuestro país, cada uno con diferencias en su origen y alcance. Un ejemplo exitoso es el de Xalapa, Veracruz, donde en el 2005 surge desde la sociedad organizada un proyecto llamado “Cogestión Integral de la Subcuenca del Río Pixquiac”, buscando canalizar recursos para la conservación y restauración de dicha subcuenca. Tras años de trabajo, en el 2019 se logra una colaboración entre la sociedad civil y el ayuntamiento de la Ciudad: la “Estrategia para la gestión Integral del Recurso Hídrico Xalapa (EGIRH-X)”. Hasta ahora la EGIRH-X ha permitido la conservación de más de 1,000 ha de bosque gracias al pago por servicios ambientales, ha promovido y fortalecido alianzas entre el sector público y el privado, ha significado un ahorro del 30% de los ingresos económicos de familias con SCALL y ha realizado actividades de educación y divulgación en escuelas, entre otras cosas (Winograd *et al.*, 2021).

Por otro lado, el ejemplo de la Cuenca Atoyac-Zahuapan en Puebla, documentado y compartido por la Coordinadora Por un Atoyac con Vida (2017). Tras más de 20 años de lucha y denuncias por parte de la Coordinadora por Un Atoyac con Vida, un grupo de pobladoras y pobladores

organizados, la CNDH emitió en marzo del 2017 la Recomendación 10/2017 al Ejecutivo Federal y a los gobiernos de los estados de Puebla y Tlaxcala. Dicha recomendación fue emitida por la violación de diversos derechos humanos (a un medio ambiente sano, al saneamiento de agua y al acceso a la información, entre otros) de habitantes y transeuntes de la cuenca Atoyac-Zahuapan, por la contaminación de los ríos Atoyac, Xochiac, Zahuapan y sus afluentes (Coordinadora por un Atoyac con Vida, 2017).

Como resultado, en junio del 2018 el Gobierno Constitucional del estado de Puebla publicó en su periódico oficial el acuerdo aprobatorio para el “Plan Rector para el Saneamiento del Río Atoyac”, elaborado bajo “una perspectiva sistémica, integral y transversal” (Estado de Puebla, 2018, pp. 5) y reconociendo la necesidad de participación tanto de agentes gubernamentales, como de sociedad civil organizada, sector productivo e instituciones académicas.

En cuanto a sus avances, en un comunicado oficial del Gobierno de Puebla en diciembre del 2020, se reforzó el compromiso y se aseguró la existencia de una “hoja de ruta” con las tareas y cumplimiento (Gobierno de Puebla, 2020), mientras que en marzo de este año (2023), el Titular de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Tlaxcala aseguró que el cumplimiento de la Recomendación 10/2017 ha superado el 100% en el Estado (De la Luz, 2023). Sin embargo, denuncias desde la sociedad civil organizada y grupos ambientalistas en diferentes plataformas aseguran que las acciones gubernamentales han sido deficientes e imprecisas, por lo que la población y los ecosistemas siguen en riesgo y todavía hay mucho trabajo por delante (Arellano-Aguilar, 2023; Sosa, 2023; Zárata, 2023).

Los casos anteriores demuestran que, aunque es posible incorporar una GIA en México, el monitoreo y evaluación continuos, acompañados de la participación de la sociedad civil organizada y grupos colegiados, son fundamentales para una implementación exitosa. Además, en ambos casos, se destaca que la creación de un organismo plural y participativo es esencial en el proceso de planificación y la rendición de cuentas a lo largo de todo el proyecto. Todo esto constituye una lección valiosa para futuros proyectos de GIA en nuestro país.

### 3.6 Soluciones basadas en la naturaleza

Durante las últimas décadas se ha impulsado la implementación de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) como herramientas para enfrentarse a la crisis climática. Las SbN son sistemas naturales y/o construidos que utilizan, se inspiran o se apoyan en funciones ecosistémicas existentes en la naturaleza (Frantzeskaki, 2019), incluyendo procesos físicos, químicos y microbiológicos (O’Hogain y McCarton, 2018), para aumentar la resiliencia urbana y/o ecosistémica y permitir la adaptación y mitigación de amenazas climáticas. Destacan sobre otras estrategias por su capacidad de proveer múltiples beneficios a costos bajos o razonables (Gómez-Martín *et al.*, 2020), permitiendo la protección, manejo y restauración de ecosistemas naturales o modificados y pudiendo ser aplicadas a diferentes escalas (ONU-Agua, 2018; Oral *et al.*, 2020).

Algunos de los beneficios asociados a las SbN, según su área de implementación, son la mejora en la calidad del agua, el aumento o mantenimiento de la biodiversidad nativa, la regulación de microclimas urbanos y la reducción del gasto energético, entre muchos otros (Oral *et al.*, 2020). O’Hogain y McCarton (2018) aseguran que para elegir la SbN a implementar, es fundamental pensar, actuar e interactuar diferente con la problemática a resolver. En este sentido, identifican algunos principios básicos para su implementación: 1) entender el contexto del problema, 2) identificar soluciones alcanzables, 3) evaluar cada alternativa y considerar sus limitaciones prácticas y de gobernanza y 4) prepararse para su implementación.

En el mismo sentido, Frantzeskaki (2019) realizó un análisis comparativo y logró identificar algunas lecciones determinantes para su implementación, por ejemplo: la necesidad de que las SbN sean estéticamente atractivas para la ciudadanía y la importancia de la confianza en el gobierno local y las fases de experimentación. Como conclusión, resalta la importancia de la unión disciplinaria durante su diseño y co-creación, resaltando la colaboración entre la sociedad civil y los niveles de gobierno o tomadores de decisiones. Considerando lo descrito en la *sección 1.1.* sobre urbanización y agua, es indiscutible la necesidad de un cambio en la manera en la que hoy en día se usa el agua, particularmente en las ciudades. Este cambio, como lo mencionan O’Hogain y McCarton (2018), debe ser de pensamiento, acciones y relaciones.

En diversas partes del mundo existen ya proyectos de implementación de SbN relacionadas con el acceso, restauración o conservación del agua. Por ejemplo, el proyecto de Isla Urbana, operando desde el 2009 en la Ciudad de México, que a través de sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) ha beneficiado a más de 640,000 personas, con una cosecha anual de aproximadamente 2,000 millones de litros (Isla Urbana, 2022). Otro ejemplo es el de la restauración del paisaje ocurrido en Rajasthan, India: tras años de precipitación muy baja y cambio de uso de suelo excesivo, la región comenzó a enfrentarse a sequías que amenazaban la seguridad hídrica de las personas y ecosistemas. La unión entre una ONG (Tarun Bharat Sangh) y las comunidades locales para hacer restauración de paisaje a través de la gestión de bosques, suelos y agua, permitió el aumento del nivel freático, de la productividad agrícola y de la capacidad de retención de agua en el suelo, entre otros beneficios socioeconómicos (Sinhg, 2016 como se citó en ONU-Agua, 2019).

Según cada contexto (climático, social, económico) existen diferentes SbN aplicables, algunas de ellas son: la recolección de agua de lluvia (Van Dijk *et al.*, 2020; Garcia-Coll, 2023), la instalación de jardines y otras superficies infiltrantes (Sharma y Malaviya, 2020), la construcción o restauración de humedales (O'Hogain y McCarton, 2018), la instalación de azoteas verdes o jardines verticales (Mihalakakou *et al.*, 2023), entre otras.

### *3.7 Universidades como laboratorios vivientes para la sostenibilidad*

Marlow *et al.* (2013) aseguran que el manejo del agua en las ciudades es un factor clave para alcanzar su sostenibilidad. Explican que el manejo urbano sostenible del agua busca gestionar el ciclo urbano del agua de tal modo que se produzcan más beneficios que en los enfoques tradicionales. Es importante tener presente que el manejo debe ser abordado considerando los contextos históricos, culturales, económicos, sociales y naturales de cada lugar (Li *et al.*, 2015). Por lo anterior, se vuelve especialmente complicada la incorporación de planes de manejo sostenible a grandes escalas, dígame, por ejemplo, en las mayores metrópolis de nuestro país: Ciudad de México, Tijuana, Monterrey, Guadalajara, entre otras. Es por ello que desde hace un par de décadas se ha impulsado la idea de considerar a los campus universitarios, particularmente

las macro-universidades, como laboratorios vivientes para la sostenibilidad (Lindstrom y Middlecamp, 2017).

De acuerdo con Zakaria *et al.* (2016), las universidades contribuyen significativamente al desarrollo de nuestras sociedades, por lo tanto, tienen una responsabilidad social esencial, particularmente con la sensibilización de determinados temas o difusión de información, así como con la formación de jóvenes en temas relacionados con la sostenibilidad. Además, como describen Verhoef y Bossert (2019), al estar inmersas en dinámicas dentro de ciudades y al mismo tiempo tener sus propias dinámicas internas, son parte de sistemas urbanos complejos, pudiendo actuar simultáneamente en diversos niveles: ser un ejemplo junto con sus tomadores(as) de decisiones a niveles de gobierno locales y regionales; movilizar o fomentar soluciones transdisciplinarias y en conjunto con la industria; y formar a los y las estudiantes como posibles futuros líderes en el campo de la sostenibilidad.

En México se encuentra una de las macro-universidades más importantes de América Latina: la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). De acuerdo con Oyama *et al.* (2018), la UNAM se encuentra en una transición hacia la sostenibilidad, sin embargo, al igual que la mayoría de las macro-universidades, aún tiene muchos retos por resolver. Los autores mencionan algunas de las problemáticas relacionadas, como la ausencia de una visión integral sobre la sostenibilidad y la priorización de la enseñanza y el manejo operacional sobre la investigación y la cultura. Además, destacan que dado su carácter público y sus recursos humanos, financieros y físicos, la UNAM tiene un gran potencial de incidencia en el desarrollo sostenible del país; ya sea a través de sus actividades de investigación y docencia o aquellas de extensión de la cultura. Por lo anterior, se vuelve fundamental asegurar dicha transición hacia la sostenibilidad en esta Universidad, enfatizando la necesidad de impulsarla desde diferentes áreas: agua, energía, residuos sólidos, cultura, entre otros.

### 3.8 *Agenda para la Sostenibilidad Universitaria*

En abril del 2022 se publicó el Plan Integral para la Sustentabilidad desde la UNAM (PISU), un documento rector para consolidar a la UNAM como una universidad sustentable. En él se



“definen las directrices generales para consolidar la inclusión de la sustentabilidad en las tareas sustantivas de la Universidad: la docencia, la investigación y la extensión de la cultura” (CoUS y SDI, 2022, p. VII). Cuenta con tres temas centrales, cada uno con objetivos generales, específicos y líneas estratégicas. Además, tiene tres ejes transversales: la construcción de alianzas, la participación de la comunidad universitaria y el compromiso institucional.

El Tema Central 2, “La Sustentabilidad como referente en el diseño y gestión de los espacios y actividades universitarias” busca impulsar la sustentabilidad en el diseño, gestión, operación y uso de los espacios universitarios, con la intención de que la UNAM funcione como un “laboratorio viviente” para el desarrollo de estrategias innovadoras e incluyentes. En la Tabla 1 se destacan algunos de los objetivos y líneas de este tema central que tienen una relación directa con los objetivos de este proyecto.

**Tabla 1.** Objetivos generales, específicos y líneas estratégicas del PISU (CoUS y SDI, 2022) alineados con este proyecto

<b>Objetivo general 2.1</b> Promover el adecuado manejo y la preservación de los suelos, las áreas verdes y las reservas naturales en los campus de la Universidad.	
<b>Objetivos específicos</b>	<b>Líneas estratégicas</b>
<b>2.1.1</b> Ordenar y planificar el uso de los espacios dentro de los campus universitarios.	<b>2.1.1a</b> Desarrollar estudios diagnósticos del estado de los suelos, áreas verdes y reservas naturales terrestres y acuáticas, compilar y hacer accesible la información existente.
<b>2.1.2</b> Preservar los suelos, las áreas verdes y las reservas naturales dentro de los campus y sedes universitarias, su biodiversidad y los servicios ecosistémicos que prestan a la sociedad.	<b>2.1.2c</b> Incrementar la superficie no sellada para favorecer la recarga de acuíferos. <b>2.1.2d</b> Incrementar la superficie de áreas verdes cubiertas con vegetación nativa.
<b>2.1.3</b> Fomentar el conocimiento y la valoración de los suelos, las áreas verdes y reservas naturales de los campus, así como de los servicios ecosistémicos que estos elementos aportan a la sociedad.	<b>2.1.3b</b> Promover actividades culturales, educativas y de investigación en áreas verdes y reservas naturales terrestres y acuáticas de la Universidad, orientadas a reconocer la importancia de estos espacios.
<b>Objetivo general 2.3</b> Transitar hacia el manejo integral y eficiente de los recursos hídricos en todos los espacios universitarios.	

<p><b>2.3.1</b> Generar instrumentos y mecanismos que permitan llevar a cabo una gestión integral de los recursos hídricos, atendiendo las necesidades particulares de cada sede.</p>	<p><b>2.3.1a</b> Desarrollar estudios diagnósticos del estado de los sistemas de suministro, uso, consumo, tratamiento y disposición de agua, con el fin de identificar las prioridades de atención en las distintas sedes universitarias.</p> <p><b>2.3.1b</b> Desarrollar estudios de factibilidad para mejorar la gestión de los recursos hídricos utilizados por la Universidad.</p> <p><b>2.3.1.f</b> Diseñar e implementar campañas de comunicación que promuevan el manejo integral de los recursos hídricos por parte de todos los sectores.</p>
<p><b>2.3.3</b> Garantizar que la calidad del agua que se extrae, almacena, distribuye, consume y reutiliza en las instalaciones universitarias sea la adecuada dependiendo de su uso.</p>	<p><b>2.3.3a</b> Promover la protección de los acuíferos de los que se abastece la Universidad para asegurar una buena calidad del agua.</p>

## 4 Metodología

### 4.1 Área de estudio

#### 4.1.1 Ubicación geográfica y clima

La Ciudad Universitaria (CU) de la Universidad Nacional Autónoma de México tiene una extensión de 730 hectáreas y se encuentra en la zona sur de la Ciudad de México, Alcaldía Coyoacán, entre las coordenadas geográficas 19°20'18" - 19°18'23" Norte y 99°12'05" - 99°10'11" Oeste. Su altitud varía entre los 2250 y los 2350 metros sobre el nivel del mar y tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (junio a octubre), [Cb(w1)w] siguiendo la clasificación climática de Köeppen, modificado por García (1964). Presenta una temperatura media anual de 15.6 °C y una precipitación media anual de 835 mm (Castillo-Argüero *et al.*, 2004).

De acuerdo con el Plan de Gestión del Campus Central de la Ciudad Universitaria UNAM (2017), se compone por tres zonas (Figura 2): Zona de Conservación Patrimonial (ZCP)(176 ha), Zona de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA)(237 ha) y Zona de Desarrollo Controlado (ZDC)(320 ha).

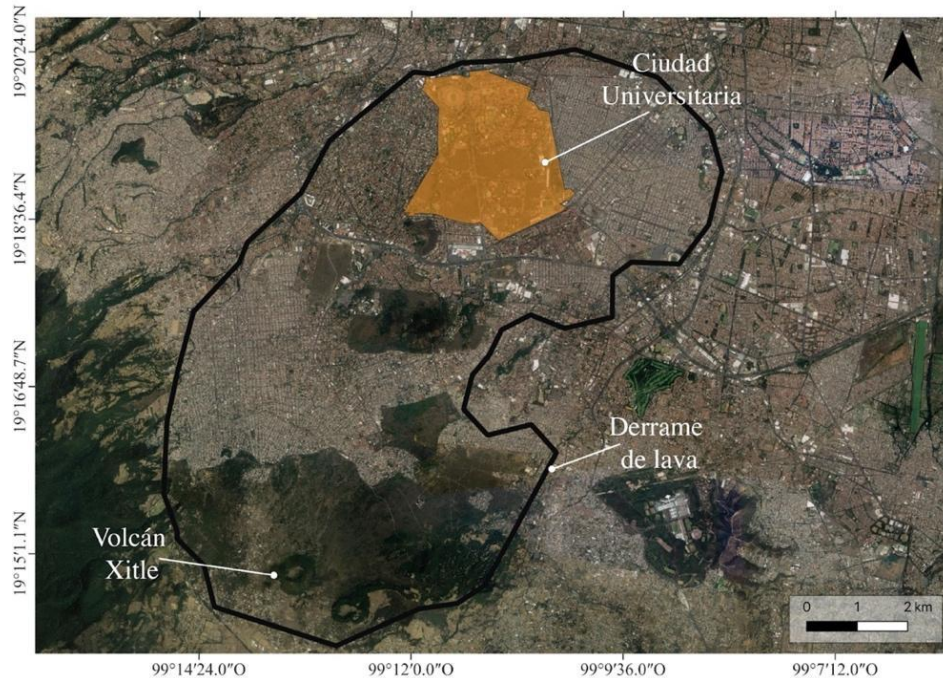


**Figura 2.** Zonificación de Ciudad Universitaria. Adaptada del Plan de Gestión del Campus Central de la Ciudad Universitaria UNAM (2017, p. 101)

Con la expansión urbana que sucedió entre principios de los años 50 (inicio de la construcción de CU) y la actualidad, CU fue rodeada por el desarrollo urbano y quedó, en palabras de Ortíz-Chao y Esparza (2020) como una “ciudad dentro de la ciudad”. Así, los límites de CU son: al poniente con la colonia Jardines del Pedregal (baja densidad poblacional) y al oriente con el Pedregal de Santo Domingo (muy alta densidad poblacional). Además, tiene el tamaño poblacional de una ciudad media, con una afluencia diaria de aproximadamente 300 mil personas, entre estudiantes, docentes, investigadores, trabajadores y público en general (Moreno, 2019).

#### *4.1.2 Geología y vegetación*

El material parental característico de CU es la roca volcánica. Su origen data de hace  $1670 \pm 35$  años, cuando la erupción del volcán Xitle originó el descenso de flujos de lava por una distancia de 12 km sobre las laderas del Ajusco y parte de las planicies del Valle de México (Siebe, 2009), cubriendo aproximadamente 80 km<sup>2</sup> de la porción sur de la Ciudad de México (Figura 3)(SEREPSA, 2016). Con el enfriamiento de las lavas se formó una capa de piedra porosa fundamental para el ciclo hidrológico local y regional de la Cuenca de México, debido a que favorece la infiltración del agua de lluvia, dirigiéndola al subsuelo, lo que contribuye a la recarga del manto freático (SEREPSA, 2016). Debido a la presencia de dicha capa de roca volcánica, el suelo en las superficies con ecosistema originario es muy somero y poco desarrollado y la vegetación asociada es el matorral xerófilo de alta elevación (SEREPSA, 2016).



**Figura 3.** Extensión de las lavas del Xitle y ubicación de CU. Elaboración propia a partir de Lot y Camarena (2009)

### *La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel*

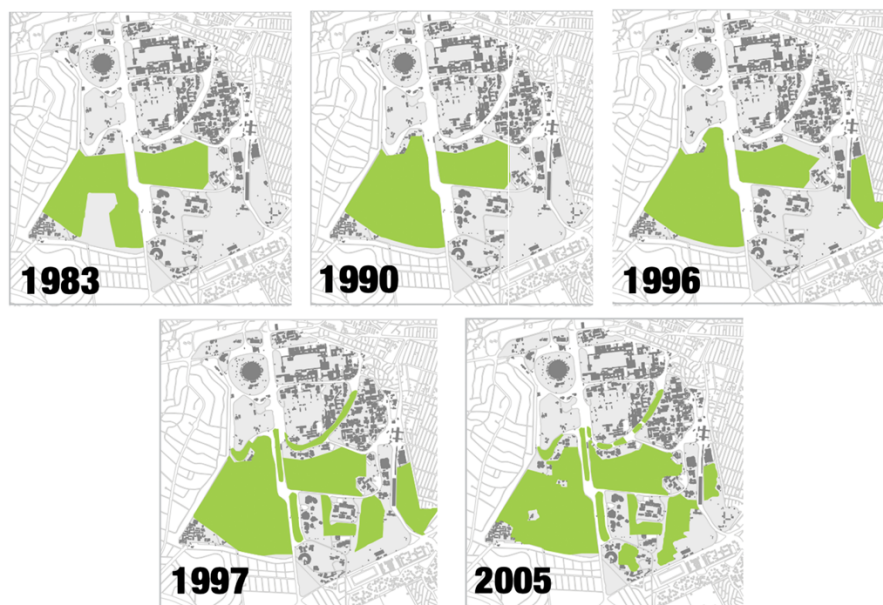
Desde 1983 se estableció en la UNAM una zona ecológica inafectable que hoy en día abarca 237 hectáreas: la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA). La vegetación en la REPSA se compone en su mayoría de plantas de baja altura (arbustos y hierbas) que se encuentran adaptadas a ambientes secos. Este ecosistema ha ido evolucionando a través de un primer proceso de colonización posterior a la erupción, hasta llegar a lo que es hoy en día, con más de 1,500 formas de vida coexistiendo entre sí (REPSA, 2016). Entre las especies representativas destacan las perennes como la dalia (*Dahlia coccinea*, *D. Pinnata*), la oreja de burro (*Echeveria gibbiflora*, *E. coccinea*), el palo loco (*Pittocaulon praecox*), el tepozán (*Buddleja cordata*, *B. sessiliflora*), entre otras (Castillo-Argüero *et al.*, 2016). Por otro lado, al estar expuesta a una constante presión antropogénica, la REPSA ha sido susceptible a cambios en su estructura y composición por la introducción de especies como el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), la casuarina (*Casuarina equisetifolia*), el eucalipto (*Eucalyptus resinifera*), entre muchas otras (*idem*).



**Figura 4.** *Echeveria gibbiflora* en colada de lava cubierta por líquenes. Foto: Melissa López Portillo, mayo de 2023

Cabe mencionar que la superficie que abarca actualmente la REPSA no ha sido la misma desde su formación: inicialmente, en 1983, contaba con 124.5 ha; en 1990 la superficie aumentó a 146.8 ha y se definieron zonas núcleo y de amortiguamiento; para 1996 se incrementó a 172 ha y se mantuvo la designación de zonas núcleo y de amortiguamiento; el siguiente año (1997), se alcanzó un nuevo acuerdo donde se introdujo la figura de “Áreas Verdes de Manejo Especial (AVME)” que fungían como zonas de amortiguamiento, aumentando 35.6 ha que sumadas a las 172 y a otras 5 aumentadas en ese mismo acuerdo, alcanzaron las 212 ha. Por último, en 2005 se incrementaron 24.8 ha, bajo el “Acuerdo por el que se rezonifica, delimita e incrementa la zona de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria”, alcanzando su área actual de 237.3 ha (Pérez-Escobedo, 2013). En la Figura 5 puede verse la evolución de la superficie ocupada por la REPSA a través del tiempo.





**Figura 5.** Cambio de la superficie de la REPSA a través del tiempo. Adaptada de SEREPSA (2016)

El sustrato que predomina en las zonas núcleo es el basalto gris oscuro de olivino con microcristales (Rzedowski, 1954), con espesores<sup>3</sup> que pueden variar entre 50 cm y 10 m, o hasta 40 m. Por otro lado, las zonas de amortiguamiento tienen un suelo frecuentemente perturbado por la presencia de basura inorgánica y cascajo acumulados sobre el sustrato anteriormente mencionado. De acuerdo con un estudio realizado por Castellanos Vargas *et al.* (2017), el suelo se encuentra aún en proceso de desarrollo, resultando en una clasificación taxonómica incierta, por lo que puede pertenecer a tres posibles órdenes: Entisol háplico, Litosol volcánico o Andosol vítrico; para más detalles se sugiere consultar la fuente.

### *Superficies infiltrantes en Ciudad Universitaria*

Debido a los diferentes usos del espacio y a los valores estéticos asociados a la jardinería, se identifican cuatro principales superficies infiltrantes en CU: ecosistema originario no perturbado (REPSA), superficies combinadas, zonas ajardinadas y espacios deportivos (canchas). Es importante mencionar que se habla de “superficies infiltrantes” y no de “suelos” puesto que en este trabajo no se abordarán aspectos sobre su composición o características edafológicas.

<sup>3</sup> Aún no hay estudios o mediciones que reporten el espesor máximo de la lava.

El primer tipo de superficie (Figura 6A) corresponde a la REPSA y tiene las características mencionadas en la sección anterior. Al ser lavas basálticas jóvenes, tienen una alta conectividad hidráulica debido a la presencia de poros de diferentes tamaños y formas, grietas y fracturas (Guilbaud *et al.*, 2021). Por lo antes mencionado, estas superficies tienen la capacidad de infiltrar prácticamente toda el agua que cae sobre ellas, teniendo una importancia fundamental para la recarga de acuíferos. El segundo tipo de superficies son las combinadas (Figura 6B), contando con afloramientos rocosos con vegetación originaria, por lo que cuentan con las características infiltrantes previamente mencionadas, y rellenos o emparejamientos del nivel tras la adición de cascajo o “tierra de monte” (tierra traída de las zonas montañosas del sur de la Ciudad) para formar jardines con especies vegetales introducidas, generalmente exóticas.



**Figura 6.** Coberturas de A: REPSA y B: superficies combinadas. Fotos: Melissa López Portillo, mayo del 2023

La superficie ajardinada (Figura 7A) hace referencia a aquellos espacios donde se modificó por completo el paisaje originario mediante un proceso de relleno de la superficie rugosa original, utilizando tierra de monte, tierra de los alrededores (obtenida en la fase de cimentación durante la construcción de edificios) y/o cascajo. Por el flujo y enfriamiento de la lava, se formó una



superficie rugosa con grietas, hondonadas y fracturas, caracterizada por desniveles abruptos, existiendo zonas con rellenos de hasta 5-6 m de profundidad (P. Rodríguez, *comunicación personal*, 30 de marzo de 2023). Se caracteriza por el dominio de vegetación exótica introducida, ya sean herbáceas y pastos (kikuyo: *Pennisetum clandestinum*; pasto rosado: *Melinis repens*; bola del rey: *Leonotis nepetifolia*; entre otras), plantas de ornato (bugambilia: *Bougainvillea glabra*; hortensia: *Hydrangea macrophylla*; entre otras) o bien, árboles de gran tamaño (casuarina: *Casuarina equisetifolia*; eucalipto: *Eucalyptus resinifera*; pirul: *Schinus molle*; etc). Por el tipo de vegetación y los requerimientos estéticos, estas zonas son de alto mantenimiento, requiriendo riego y poda continuos.

Por último, los espacios deportivos (Figura 7B) hacen referencia a las canchas que se encuentran en el campus (fútbol soccer, americano, usos múltiples, béisbol, etc). Este tipo de superficie es la que representa una mayor modificación al suelo originario, pues se requieren sustratos duraderos y que no se inunden. De acuerdo con Pablo Rodríguez, trabajador del campus que estuvo encargado de la construcción de varios de estos espacios entre los años 70-90's, las etapas para hacer las canchas fueron las siguientes:

1. Dinamitación de la roca basáltica para poder retirar o nivelar el suelo.
2. Emparejamiento del terreno con un tractor de banda.
3. Adición de una capa de tepetate. El espesor varía entre 80 cm y 1 m, según la necesidad.
4. Instalación de drenes para la salida del agua. En el caso de CU se utilizaron drenes de concreto de 20 cm de diámetro perforados en la parte superior, de modo que el agua que cayera sobre el sustrato entrara en ellos y fuera redirigida hacia el exterior de las canchas.
5. Adición de tres capas de grava de aproximadamente 20-30 cm de espesor cada una. El tamaño de la grava es de 1 pulgada para la capa más profunda,  $\frac{3}{4}$  de pulgada para la intermedia y  $\frac{1}{2}$  pulgada para la superior.
6. Por último, adición de una capa de tierra vegetal de ~30 cm de espesor de tierra de monte (proveniente del Ajusco o de Xochimilco) o bien, de tierra de los alrededores. En esta capa se coloca el pasto.



**Figura 7.** Coberturas de A: superficie ajardinada y B: espacio deportivo. Fotos: Melissa López Portillo, mayo del 2023

En la Tabla 2 se resumen las características de los cuatro tipos de superficies mencionadas.

**Tabla 2.** Características de las superficies infiltrantes de Ciudad Universitaria

Tipo de superficie	Presencia de especies nativas	Presencia de especies introducidas	Mantenimiento requerido	Relleno del sustrato	Dstrucción de la roca parental
Ecosistema originario	Muy alta	Baja	Ninguno	Ninguno	No
Combinada	Media a alta	Media	Bajo	Bajo	No
Ajardinada	Baja	Alta	Alto	Medio – alto	En ocasiones
Deportiva	Ninguna	Muy alta	Muy alto	Muy alto	Sí

*Nota: la clasificación va en orden descendente empezando por muy alto, alto, medio, bajo, ninguno; o bien, sí, no o en ocasiones.*

### 4.1.3 Hidrología

Ciudad Universitaria se encuentra en la región hidrológica administrativa (RHA) XIII, al surponiente de la Cuenca del Valle de México, en la subcuenca hidrológica VI, Ciudad de México (Figura 8). La Cuenca del Valle de México (CVM) abarca una superficie aproximada de 9738 km<sup>2</sup>, cubriendo parte de los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México y la mayor parte de la Ciudad de México (Tapia y Morales, 2013). Se ubica en la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano, por lo que su naturaleza topográfica la hace una cuenca endorreica (cerrada) al estar rodeada por diversas serranías; sin embargo, desde finales del S. XVIII se abrió artificialmente por el Tajo de Nochistongo. Por su ubicación geográfica, es una de las zonas más densamente pobladas de México.



**Figura 8.** Ubicación de CU según cuenca y región hidrológico-administrativa. Elaboración propia con información de INEGI

Con finalidades administrativas, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) estableció que la Cuenca del Valle de México tiene siete acuíferos; sin embargo, los límites que existen entre dichos acuíferos son determinados por aspectos administrativos y no por condiciones naturales. CU se encuentra dentro del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (1900 km<sup>2</sup> de superficie). De acuerdo con Lesser *et al.* (1998), la principal fuente de recarga del acuífero es

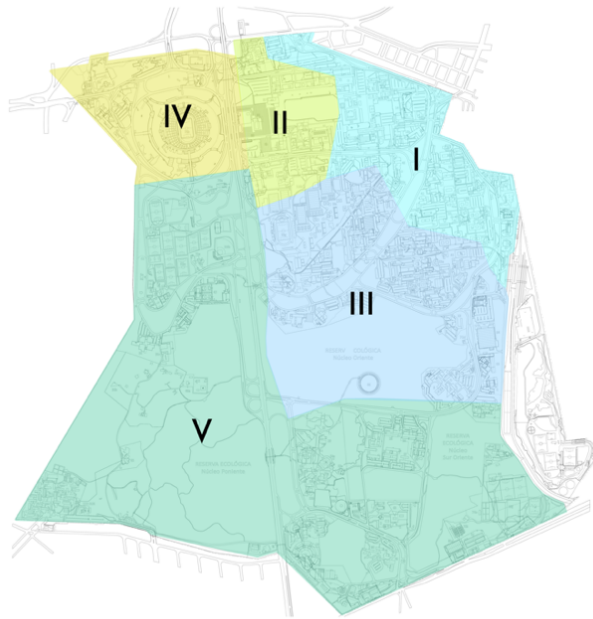
la infiltración de la precipitación que ingresa sobre los flancos de las serranías circundantes, principalmente en aquellas al sur de la Ciudad (de las Cruces y Chichinautzin), gracias a la alta permeabilidad de las rocas existentes (basaltos).

Por otro lado, Canteiro *et al.* (2019) describen que bajo la zona de expansión de las lavas del Xitle (80 km<sup>2</sup>), en las municipalidades de Álvaro Obregón, Coyoacán y Tlalpan, se encuentra un acuífero somero que es independiente del acuífero principal, coexistiendo con él, pero a diferente profundidad. De acuerdo con los autores, ambos acuíferos tienen el mismo origen (agua de lluvia) y la misma dirección de flujo del agua, pero distintas áreas de recarga y tiempos de residencia. Los estudios que realizaron indican que la REPSA en Ciudad Universitaria y el bosque de Tlalpan se encuentran sobre la parte media del acuífero somero, así, aunque la principal recarga del acuífero ocurre en las áreas cercanas al cono del Xitle, en las laderas de la serranía del Ajusco (Chichinautzin), una parte importante de la infiltración tiene lugar en esas áreas verdes aún preservadas.

#### *4.1.4 El Manejo del Agua en Ciudad Universitaria*

##### *La Sectorización*

Con la finalidad de incrementar la eficiencia hidráulica y tener un mayor control operativo sobre diversos parámetros (presión, detección de fugas, cantidad y calidad de agua, entre otros), con el inicio del PUMAGUA entre los años 2009 y 2010, se realizó una sectorización hidráulica en CU. Su diseño obedeció a la topografía del campus, así como a la ubicación y capacidad hidráulica de los componentes de la red con respecto a la demanda de agua de los usuarios (Rocha, 2010). Con ello, se definieron de forma integrada cinco sectores hidráulicos (Figura 9), considerando la infraestructura disponible y el mínimo de cortes, conexiones, modificaciones de válvulas y tuberías, procurando mantener las zonas de servicio definidas de acuerdo con las políticas de operación del sistema que operaban en el momento. Para definir el funcionamiento hidráulico de cada uno, se realizaron simulaciones de las presiones en el sistema.



**Figura 9.** Sectores hídricos de Ciudad Universitaria. Elaboración propia a partir de Rocha (2010)

En la Tabla 3 se resumen algunas características de los cinco sectores hidráulicos. Es importante mencionar que esta sectorización permitió definir zonas de suministro autónomas, no independientes, en la red de distribución, facilitando su operación.

**Tabla 3.** Características de los sectores hídricos de Ciudad Universitaria

Sector	Tanque de suministro	No. entidades	Antigüedad* (años)	Longitud* (m)	Gasto (l/s)
<b>I</b>	Bajo	39	>50	14,110	Alta: 9.61 Baja: 2.3
<b>II</b>	Bajo	20	>50	8,884	8.9
<b>III</b>	Bajo	31	>50	10,545	8.1
<b>IV</b>	Alto	20	-	4,510	Estadio lleno: 6.94. Normal: 0.88
<b>V</b>	Vivero Alto	39	>30	15,446	3.18

Fuente: Rocha, 2010; PUMAGUA, 2019

## *El Ciclo Urbano del Agua en Ciudad Universitaria*

Actualmente la parte operacional del ciclo urbano del agua (CUA) en CU es gestionada por la Dirección General de Obras y Conservación (DGOC), a través del taller de Hidráulica de la Dirección de Conservación. Desde el 2009 existe el Programa de Manejo, Uso y Reuso del Agua en la UNAM (PUMAGUA), que apoya con el monitoreo y control de fugas y análisis de calidad del agua.

CU cuenta con su propio sistema de abastecimiento y distribución de agua potable, que puede dividirse en tres grandes etapas: captación, almacenamiento y distribución. Las anteriores etapas pueden subdividirse a su vez en seis etapas básicas que permiten una comprensión más completa de la parte social del ciclo urbano del agua en el campus (CUA-CU): captación, conducción y almacenamiento, distribución y uso, recolección, tratamiento y descarga. Estas etapas serán descritas a mayor detalle a continuación.

### *Captación*

El agua que se utiliza en CU se obtiene a través de tres pozos profundos de extracción de uso exclusivo para el campus y concesionados por la CONAGUA: Química (PQ), Multifamiliar (PMF) y Vivero Alto (PVA)(Figura 10A). En cada pozo de extracción se encuentra un sistema automático de desinfección con hipoclorito de sodio al 13% (PUMAGUA, 2017). En la Tabla 4 se encuentran algunos datos técnicos.



**Figura 10.** Ubicación de A: pozos de extracción y tanques de almacenamiento; B: plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Elaboración propia a partir de Rocha (2010)

**Tabla 4.** Información técnica sobre los pozos de extracción y tanques de almacenamiento (Título de concesión – CONAGUA, 2010)

Pozo	Profundidad (m)	Gasto (L/s)	Abastecimiento (%)
Multifamiliar	193	91	60
Vivero Alto	157	45	30
Química	132	31	10
<b>Volumen total concesionado: 2,984,659 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup></b>			

Para este proyecto, el volumen total concesionado será considerado como el volumen total extraído anualmente. Cada pozo cuenta con un medidor de propela que permite reportar mensualmente la extracción total de cada uno a la CONAGUA, por lo que se lleva un registro diario por hora con la lectura del medidor durante el tiempo de operación de las bombas (Rocha, 2010).

Cerca del 90% del agua extraída proviene de los pozos PMF y PVA, que funcionan diariamente, mientras que el 10% restante corresponde al pozo PQ, que se mantiene como reserva y trabaja únicamente cuando el PMF está en servicio o para evitar su inactividad y posible contaminación.

La cantidad de agua que se extrae varía a lo largo del año, teniendo como puntos más bajos los períodos vacacionales durante los meses de diciembre, enero y julio. Con respecto al período de máximo confinamiento por el virus COVID-19, PUMAGUA (2020) registró que no hubo un descenso en los volúmenes extraídos, a pesar de la poca o nula actividad en las instalaciones. Lo anterior se debió por un lado a la presencia de fugas y cambios de presión en la red, cuestiones que no pudieron ser atendidas durante meses debido a las restricciones sanitarias de la Universidad, y por otro a la conexión con la red hidráulica de SACMEX, medida de apoyo ante la contingencia. Es decir, la UNAM distribuyó agua a las colonias vecinas; esta conexión se comportó como “descarga libre” y se determinó por la DGOC un gasto máximo de 15 l/s (PUMAGUA, 2020).

Con respecto a su antigüedad, el PQ fue el primero en el campus, construido a inicios de los años 50, el PMF es de los años 60 y el PVA de los 80, siendo reubicado en 1983. Los tres pozos reciben una limpieza anual y cada 5 años se realiza un mantenimiento completo que incluye tratamiento químico y eliminación de incrustaciones mediante cepillado y limpieza (Marini, 2012).

## *II. Conducción y almacenamiento*

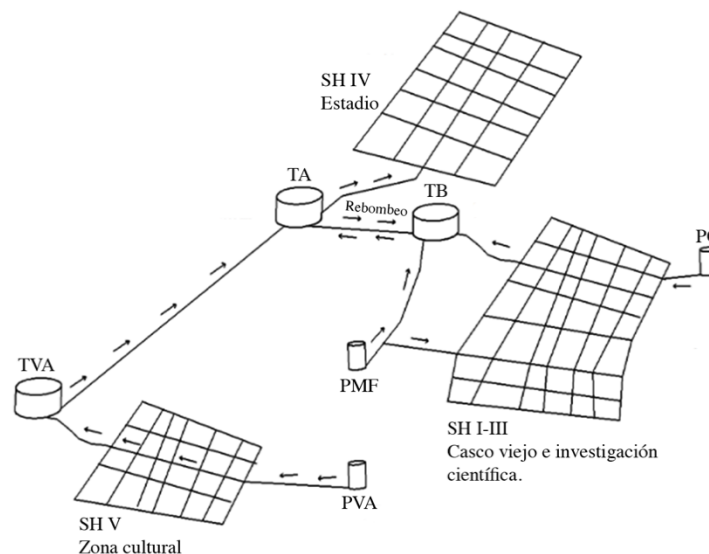
El agua extraída es llevada a tres tanques de almacenamiento superficiales que en total albergan 12 m<sup>3</sup> (Tabla 5) (Figura 10B): Tanque Alto (TA), Tanque Bajo (TB) y Tanque Vivero Alto (TVA). Además de almacenamiento, cumplen con una función reguladora y en el proceso de conducción se monitorean factores físico-químicos en tiempo real. Los tanques reciben mantenimiento (lavado y pintado) y monitoreo de calidad del agua mínimo dos veces al año para cumplir con la normatividad nacional: NOM-179-SSA1-1998, NOM-127-SSA1-1994 (2000) y NOM-230-SSA1-2002.



**Tabla 5.** Características de los tanques de almacenamiento

Tanque	Volumen (m <sup>3</sup> )	Abastecimiento	Sector hídrico abastecido
Bajo	4,000	Multifamiliar	I, II, III
Alto	2,000	TB y TVA	IV
Vivero Alto	6,000	Vivero Alto	V

Como puede verse en el esquema presentado en la Figura 11 y en lo reportado en la Tabla 5, el TB es alimentado principalmente por el PMF y, ocasionalmente, por el PQ, y se encarga del suministro de los SH I-III. El TVA se alimenta del PVA y suministra al SH V. El TA alimenta el SH IV y recibe agua del TB a través de un sistema de rebombeo y, a su vez, está conectado por una línea al TVA, que también le suministra agua cuando sus niveles disminuyen rápidamente o si algún pozo no está operando correctamente. De igual modo, los tres pozos de extracción tienen algunas derivaciones directas a la red, por lo que pueden alimentarla sin que sea necesariamente almacenada en los respectivos tanques.



**Figura 11.** Esquema de distribución entre pozos y tanques en CU. Adaptado de Rocha (2010)

### *III. Distribución y uso*

La red de distribución de agua tiene como objetivo proporcionar agua a los diferentes usuarios en un sistema. En el caso de CU, PUMAGUA (2009) definió cinco tipos de usuarios: Académico, de Investigación, Cultural, Administrativo y Servicios.

La red de agua potable de CU es de tipo combinado, con configuraciones (circuitos) cerradas y abiertas, esto quiere decir que hay zonas donde las tuberías forman un tipo de malla que facilita el abastecimiento en caso de fallas, pero que dificulta la localización de fugas; y por otro lado, en el caso de las abiertas, las tuberías se ramifican a partir de una principal, lo que permite cubrir topografías irregulares, pero compromete el abastecimiento en caso de reparaciones. Por otro lado, la forma de distribución en el campus es mixta con suministros por gravedad y por bombeo.

Rocha (2010) reporta que CU cuenta con 54 km de tuberías de diferentes materiales: acero, asbesto, fierro fundido, PVC y PEAD; y diámetros: 1 a 2.5” para algunas derivaciones a edificios y tomas de riego, 3 a 6” para alimentar dependencias, 3 a 8” en la red primaria y de 10 a 12” para las líneas que conectan los pozos con los tanques. Estas tuberías dirigen el agua hacia las dependencias, ya sea para usarse con conexión directa en sanitarios o tomas de agua o para almacenarse en cisternas menores (existen cerca de 64 en el campus).

### *IV. Recolección*

La recolección se refiere al sistema de alcantarillado, cuya función en la red es desalojar las aguas de desecho (negras o grises) y canalizarlas hacia alguna de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, donde serán tratadas para su disposición final. En el caso de CU, se cuenta con un sistema combinado de alcantarillado (drenaje y pluvial) de aproximadamente 30 km de red de colectores que dirigen las aguas recolectadas hacia las diferentes PTARs que existen en el campus (Rocha, 2010).

Así, la recolección en CU inicia en las atarjeas al exterior de las edificaciones, que conectan las aguas utilizadas con los colectores (tuberías principales), estos se encargan de dirigirlas por

gravedad hacia los interceptores, que las transportan hacia uno de los tres emisores del campus o directamente a una PTAR; los emisores también dirigen lo recolectado a una PTAR.

De acuerdo con Rocha (2010), para el año en el que se realizó el levantamiento, la red de alcantarillado en el campus contaba con más de 400 pozos de visita, 44 fosas de descarga directa a la red y 18 fosas de descarga directa a grietas. Actualmente no hay un documento o información publicada que reporte con exactitud los cambios que han o no ocurrido desde entonces.

## V. Tratamiento

CU cuenta con tres Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR): Cerro del Agua (PTAR-CA), Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (PTAR-CPS) y Edificio 12 del Instituto de Ingeniería (PTAR-E12) (Figura 10B). A ellas se dirigen las aguas conducidas por gravedad desde los emisores y los interceptores de conexión directa que hay en la red de drenaje y alcantarillado del campus, excepto en la PTAR-E12, que son obtenidos por bombeo. En un principio, las PTARs del campus fueron diseñadas para procesar los volúmenes descritos en la Tabla 6, sin embargo, debido a diversas fallas pre y post-confinamiento por COVID-19, los volúmenes tratados no alcanzan los volúmenes de diseño (J. Hidalgo, *comunicación personal*, 22 de noviembre del 2022).

**Tabla 6.** Información de volúmenes de tratamiento de las PTAR del campus

PTAR	Volumen de diseño (l/s)	Volumen de operación actual (l/s)	Cumplimiento de NOMs
CA	40	15	No
CPS	7.5	-	No
E12	0.05	-	No

En un esfuerzo por cumplir con las normas y procedimientos de manejo de agua tratada, en 1997 se pusieron en operación 26 fosas sépticas o plantas tipo BRAIN (Bio-Reactor Anaerobio Integrado) que tratarían 1.8 l/s en total, buscando mejorar la calidad de las aguas de descarga directa a grietas. Sin embargo, con la implementación de PUMAGUA en 2009, fueron

clausuradas pues los volúmenes procesados no cumplían con la normatividad referente a calidad de efluentes (Cázares, 2014).

## *VI. Descarga*

En el diseño de la red de alcantarillado, la PTAR-CA se conecta con una red de tuberías de 8 km de longitud que se encarga de distribuir las aguas tratadas en 12 cisternas con una capacidad total de 5,400 m<sup>3</sup> de almacenamiento. El agua en estas cisternas se utiliza para regar cerca de 50 de las 200 hectáreas de áreas verdes del campus. Sin embargo, en 2010 se realizó un inventario mediante inspección física y se encontró que la mayoría estaba en malas condiciones como resultado de la falta de mantenimiento, presentando fugas, encontrándose abiertas o incluso sin tapas (Cázares, 2014). De igual modo, se hizo un monitoreo de calidad del agua y se determinó que la mayoría estaban fuera de lo establecido por la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Hoy en día dichas cisternas siguen funcionando para almacenar el agua que riega las 50 hectáreas asociadas, sin embargo, debido a que el volumen generado en la PTAR-CA no es suficiente, son llenadas con agua potable (A. Martínez, *comunicación personal*, 29 de noviembre del 2022).

Por otro lado, dadas las condiciones del otro par de PTAR del campus (CPS y E12), las aguas residuales del campus que no pasan por la PTAR-CA son descargadas sin tratamiento al sistema de drenaje de la CDMX, o bien, a fosas de descarga directa a grietas, principalmente en la zona sur de CU.

## *Sistema de aguas pluviales*

A finales de los años 90, en un esfuerzo por cumplir con el objetivo de la Comisión de Control Ecológico del Campus de lograr un manejo “ambientalmente adecuado” en las diversas instalaciones de CU (Hernández, 2007), la DGOC buscó optimizar la canalización de las aguas pluviales a los mantos acuíferos. Para lograrlo, se siguieron dos estrategias: en la primera, se perforaron 16 pozos de absorción con entre 4 y 50 metros de profundidad. Estos pozos cumplían con un doble propósito pues además de permitir la recarga del acuífero con agua de lluvia, se

hicieron en zonas estratégicas para evitar encharcamientos. De acuerdo con el coordinador del Departamento de Áreas Verdes y Forestación de la DGOC, hoy en día existen 24 pozos de absorción y cada año se les da mantenimiento, desazolvándolos con una draga (A. Martínez, *comunicación personal*, 29 de noviembre de 2022).

Por otro lado, se hicieron modificaciones menores en edificios y vialidades, de modo que todas las azoteas canalizan el agua de lluvia hacia grietas de infiltración o pozos de absorción y todas las vialidades y camellones cuentan con lloraderas que tienen la misma función (A. Martínez, *comunicación personal*, 29 de noviembre de 2022). Sin embargo, es importante mencionar que no se cuenta con planos sobre la infraestructura de captación y/o canalización del agua de lluvia a estas zonas de absorción, ni tampoco con algún sistema de medición de los volúmenes de agua que se infiltran.

## 4.2 Cartografía de Ciudad Universitaria: coberturas del superficie

### 4.2.1 Descripción de las coberturas

Con la finalidad de hacer una cartografía detallada de las coberturas del suelo en Ciudad Universitaria, se definieron dos grandes categorías a distinguir: *superficies infiltrantes* y *superficies selladas al agua*. Estas dos categorías permiten identificar la superficie tomando como principal atributo la capacidad de absorción o penetración del agua en la capa más superficial del suelo (primeros 5 cm de profundidad). Esta categorización se hizo para diferenciar en superficie (m<sup>2</sup>) las áreas totales del campus que sirven o tienen potencial de recargar el subsuelo y acuífero, o bien, para canalizar el escurrimiento de las aguas pluviales hacia puntos de absorción o recarga.

Como se explicó en la *sección 4.1.2.*, dentro de las categoría de superficies infiltrantes pueden distinguirse (para fines de este trabajo) cuatro subcategorías principales: ecosistema original (REPSA), combinadas, espacios ajardinados y espacios deportivos. Para simplificar, las coberturas representadas en la cartografía son tres: REPSA, espacios deportivos (canchas) y áreas verdes (espacios ajardinados y superficies combinadas). Como puede verse, las coberturas de espacios ajardinados y superficies combinadas se juntaron en una sola categoría denominada

“áreas verdes”, esto es, entre otras cosas, porque su delimitación no es muy clara; es decir, no se cuenta con límites fácilmente definibles.

Por otro lado, la categoría de *superficies selladas* hace referencia a todas esas áreas o espacios del campus donde la superficie del suelo fue totalmente cubierta con una capa de algún material impermeable, es decir, que no permite el ingreso del agua de lluvia al subsuelo. Todas estas superficies tienen algún tipo de infraestructura. Para poder hacer comparaciones y propuestas de canalización, la categoría se dividió en tres subcategorías: *estacionamiento*, *piso* y *techo*. La primera categoría permite dimensionar, de cierto modo, el valor que se le da a los automóviles sobre otros espacios sociales y recreativos del campus. La segunda hace referencia a los espacios donde cualquier persona o automóvil puede desplazarse (calles, banquetas, explanadas) y permite cuantificar, entre otras cosas, los volúmenes de agua (m<sup>3</sup>) que al precipitar entran en contacto con otros muchos componentes que pueden comprometer su calidad (aceite de carro, basura, heces, colillas, etc). Por último, la tercera subcategoría engloba las superficies que por su ubicación en altura, es poco común que alguien acceda a ellas, resaltando su potencial para dirigir o canalizar el agua de lluvia a sistemas de almacenamiento para su posterior uso o de absorción para la recarga del acuífero.

#### 4.2.2 *Mapeo de coberturas del suelo*

Para realizar la cartografía de las coberturas del suelo en CU, se siguieron dos procedimientos: identificación de coberturas a través de imágenes satelitales, utilizando un programa de sistemas de información geográfica (SIG) y verificación de sitios a través de visitas a campo. Estas fases ocurrieron simultáneamente y se describen a continuación.

##### *Identificación de coberturas mediante imágenes satelitales*

Una vez definidas las categorías y subcategorías a identificar, se utilizaron el software libre de análisis espacial QGIS (versión 3.22 Białowieża) y una imagen satelital obtenida a partir de un complemento del software (*XYZ Tiles*). Esta última fue capturada por el satélite SPOT-5 en el año 2022 y su resolución es de 5 m. Los pasos seguidos se describen a continuación:

1. Una vez cargada la imagen satelital en un proyecto de QGIS (EPSG:32614 – WGS 84 / UTM 14N), se georreferenció un mapa detallado de CU disponible en la página de la DGOC, subiéndolo como imagen ráster y utilizando el *plugin Georreferenciador GDAL*. Se realizó para tener una guía sobre aquellos espacios o elementos que no fueran accesibles físicamente o suficientemente claros en la imagen, por ejemplo, aquellas zonas donde el dosel de los árboles impide ver la cobertura a nivel piso.
2. Se crearon siete capas de *shapefile* correspondientes a las seis subcategorías mencionadas y una categoría extra denominada “agua” (espejos de agua, fuentes, alberca olímpica, entre otras). Estas capas eran editables y en ellas se identificaron manualmente los polígonos correspondientes a cada categoría. En la subcategoría de *techo*, se utilizó el *plugin Quick OSM* de *OpenStreetMap* con la clave “*buildings*”, lo que permitió agilizar la identificación cargando algunos de los elementos identificados por el *plugin*. La capa correspondiente a la cobertura *REPSA* fue compartida por la Secretaría de la Reserva Ecológica del Pedregal (SEREPSA). Esta capa fue editada mínimamente para coincidir con los límites del resto de las capas y de la imagen satelital de referencia.
3. Una vez identificados todos los elementos de cada cobertura, se exportaron los archivos *shapefile* y se realizó la cartografía con la herramienta “composición de impresión” incluida en el software.

Además de la capa *shapefile* (.shp) de REPSA, la SEREPSA también compartió dos capas que no se muestran en la cartografía final, pero que sí forman parte del análisis: capa de afloramientos rocosos y capa de cascajos. Ambas capas fueron creadas en 2012, antes del establecimiento del SRC actual (EPSG: 32614), por lo que fueron re proyectadas para utilizarse. La capa de afloramientos rocosos además fue modificada, actualizando aquellos sitios donde se han construido nuevos edificios y, por ende, se han destruido pedregales remanentes. Esta nueva capa se exportó en formato .shp y con ella se hizo una estimación de la pérdida de afloramientos durante los últimos 10 años, considerando únicamente aquellos muestreados en la capa del 2012.

### *Cambio de coberturas y superficies en el periodo 2002 - 2022*

Para tener una aproximación del cambio de coberturas en el campus durante los últimos 20 años, se siguió un proceso similar al descrito en la sección anterior, pero utilizando una imagen satelital del año 2002 disponible en el software. Se superpusieron las capas *shapefile* creadas para la cartografía y fueron modificándose según la presencia o no de los edificios, canchas y vialidades presentes en la imagen. Estas capas editadas fueron exportadas a nuevos archivos y se calcularon sus áreas (m<sup>2</sup>) para poder estimar el cambio de coberturas en porcentaje por tipo de subcategoría.

### *Remanentes de Pedregal*

La SEREPSA compartió un archivo *shapefile* con la ubicación de pedregales remanentes muestreados en el año 2012 por un servicio social. Gracias a la cartografía y a las visitas de campo pudo actualizarse esa capa, borrando o reduciendo aquellos pedregales que actualmente ya no existen o que se modificaron por construcciones. A partir de ello se obtuvo una aproximación en superficie y porcentaje de la pérdida de los remanentes de pedregal muestreados en 2012 a la fecha.

Cabe aclarar que a la capa no se le añadieron aquellos pedregales que no se muestrearon en 2012, simplemente se trabajó con los que se tenían y ya no están.

### *Verificación: visitas a campo*

Se realizaron visitas a pie y en bicicleta a los diferentes puntos del campus en donde no hubiera claridad del tipo de cobertura existente. Estas visitas también permitieron conocer el estado general de las áreas verdes que, aunque no será reportado como tal, sirvió para darse una idea del tipo o frecuencia de manejo que se realiza en ellas y de los posibles sitios para medición de infiltración. En la Figura 12 se puede ver un mismo sitio desde A) la imagen satelital y B) la visita a campo. Es evidente que de no realizar la verificación, el sitio podría entrar en la



subcategoría equivocada, pues la copa de los árboles se puede cuantificar como área verde cuando en realidad es sellada.



**Figura 12.** Importancia de la verificación en campo, donde A: imagen satelital y B: visita en campo del mismo sitio. Foto A Google Earth, 2022; foto B: Melissa López Portillo, 2022

### 4.3 Tasas de infiltración de agua en el campus

#### 4.3.1 Selección de sitios

La definición de los sitios para las mediciones de infiltración (Figura 13) se realizó con base en la cartografía terminada. Los sitios elegidos están únicamente sobre zonas de áreas verdes y canchas, es decir, toda aquella cobertura infiltrante que no corresponda a REPSA y fueron elegidos considerando su uso y ubicación (accesibilidad y representación). Se eligieron un total de 27 sitios, de los cuales 21 se encuentran en áreas verdes (12 en ajardinadas y 9 en combinadas) y 6 en canchas deportivas. En cada sitio se muestrearon entre 1 y 4 puntos, obteniendo un total de 79 valores de conductividad saturada en campo ( $K_{fs}$ ).

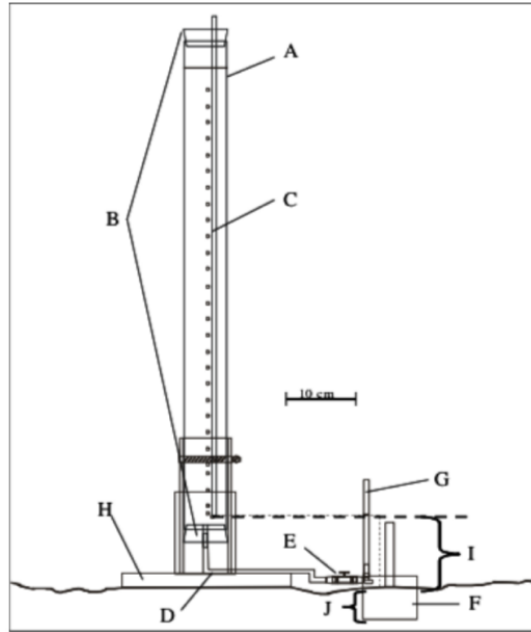


**Figura 13.** Sitios de muestreo de  $K_{fs}$  en el campus. Elaboración propia con información de SEREPSA

No se realizaron pruebas de infiltración en la cobertura correspondiente a REPSA por la dificultad asociada a la medición, en su lugar se tomaron los datos reportados por Canteiro *et al.* (2021). Las mediciones se realizaron entre octubre 2022 y enero 2023 y cada punto realizado requirió entre 1 y 12 recargas, sumando un total de 284 ensayos. El agua utilizada se obtuvo de las tomas disponibles dentro del Campus.

#### 4.3.2 Instrumentación y medición

Para estimar las tasas de infiltración en diferentes sitios del campus, se siguió el método descrito por Gómez-Tagle *et al.* (2008), utilizando un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. El equipo utilizado (Figura 14) fue de elaboración propia construido en colaboración con la Dra. Beatriz Marin del Instituto de Ecología (INECOL) en Xalapa, Veracruz.



**Figura 14.** Esquema del infiltrómetro de carga constante y anillo sello. Tomado de Gómez-Tagle (2008)

El reservorio principal (A) mide cerca de 90.5 cm de alto y su diámetro es de 6.5 cm, cada recarga es de aproximadamente 3 L de agua. En ambos extremos del reservorio se colocan tapones de hule (B), ambos perforados para colocar: un tubo de burbujeo de 90 cm de largo y 0.6 mm de grosor (C) en el tapón superior; y un codo pvc de ½” en el tapón inferior, para la conexión con la manguera y la llave de paso. La manguera que conecta el reservorio principal con la llave de paso (E) y, posteriormente, con el anillo sello (F), mide cerca de 1 m de largo, lo que permite maniobrar con el equipo. El anillo sello de acero inoxidable tiene un diámetro de 15.2 cm, una altura de 6.2 cm y un grosor de 0.1 mm. Además, tiene una salida para la conexión con la manguera y otra para un tubo plástico de 20 cm de largo que permite la salida del agua y la medición de la altura de carga.

El reservorio principal está sujetado a una brida movable con una abrazadera metálica de 14-24 mm. La brida es anclada al suelo con estacas de acampar, asegurando que el reservorio esté estable y lo más recto posible. El anillo metálico se entierra 5 cm paralelo al suelo con ayuda de un mazo de goma, aislando así la porción a analizar.

Para las mediciones realizadas se definió un intervalo de 2 cm, iniciando el registro justo al abrir la válvula, correspondiente a los 0 cm, y tomando como último valor el de 86 cm; en total se obtuvieron 44 datos por ensayo. El registro de datos se hizo con un programa escrito en Python (Anaconda-Navigator, Jupyter 6.0.3) y cada clic en el botón de “enter” registraba la hora exacta en el formato necesario (hh:mm:ss). Para ello, se utilizaron las paqueterías *pandas*, *time*, *datetime* y *os*.

#### 4.3.3 Procesamiento de datos

El infiltrómetro se encarga de medir el flujo de agua al suelo [ $\text{mm h}^{-1}$ ], por lo que para obtener valores de conductividad hidráulica saturada en campo ( $K_{fs}$ ), es necesario utilizar ecuaciones analíticas. Para ello, se utilizó el método WU2 descrito por Gómez-Tagle *et al.* (2008), que se incorporó al programa de Python mencionado previamente, de modo que al finalizar cada punto de muestreo, se obtenía el valor de  $K_{fs}$ . Las funciones cumplidas por el programa realizado en Python para la obtención de valores de  $K_{fs}$  fueron las siguientes:

1. Registrar el dato de *hh:mm:ss* cada 2 cm.
2. Mostrar dos gráficos necesarios para decidir si hacer o no más ensayos de infiltración: *tiempo contra infiltración acumulada* y *tiempo contra infiltración instantánea*.
3. Exportar las bases de datos en tres archivos *.xlsx*: horas de medición contra lecturas, altura de la columna en el tubo de carga y cálculo de los valores de infiltración (I, [ $\text{mm h}^{-1}$ ]).
4. Calcular el valor de  $K_{fs}$  con el método WU2 (para más información, revisar anexos).

Una vez que se obtuvieron los valores de  $K_{fs}$  para todas los puntos, se distinguió entre coberturas y se realizó una transformación logarítmica base 10 para verificar el cumplimiento de los supuestos de normalidad. Posteriormente, se utilizó un Anova de una vía para realizar una comparación entre coberturas.

## 4.4 Precipitación

### 4.4.1 Medición

El período de análisis comprendió seis años de datos de precipitación, de 2014 a 2019, de enero a diciembre de cada año. Para los años 2014, 2017 y 2018, la precipitación fue medida con un pluviómetro de balancín HOBO con resolución de 0.2 mm, colocado a 5 m sobre el suelo en el Jardín Botánico de la UNAM. Los acumulados de lluvia fueron registrados cada 5 min en un almacenador de datos Onset. Los datos correspondientes a los años 2015 y 2016 fueron obtenidos de la estación CCA del Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU), parte de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM. Su resolución es de 0.2 mm y sus intervalos de medición de 30 min. Por último, los datos de 2019 se obtuvieron del mismo modo que los de los años 2014, 2017 y 2018, sin embargo, su resolución temporal fue de 10 minutos.

### 4.4.2 Procesamiento de datos

Las series de datos se concatenaron y remuestrearon a 30 y 60 min con la paquetería *Pandas* de Python. Además, se identificaron los eventos de precipitación registrados durante el período estudiado; un evento de precipitación fue definido como aquel con un registro mínimo de 1 mm y con 6 horas de separación sin lluvia con respecto al siguiente evento (Driscoll *et al.*, 1989).

Se calcularon las intensidades promedio ( $I_{\text{prom}}$ , [mm h<sup>-1</sup>]) y máxima ( $I_{\text{max}}$ , [mm h<sup>-1</sup>]) de cada evento a tres resoluciones (5, 30 y 60 min); debido a los intervalos de medición de los años 2015 y 2016, no se calcularon las intensidades a 5 minutos en ese período. La  $I_{\text{prom}}$  se obtuvo calculando el promedio de la precipitación registrada en cada evento (mm) y dividiéndolo entre el tiempo de duración (h). Para la  $I_{\text{max}}$  se identificó el registro más alto de precipitación de cada evento y ese valor se multiplicó por 12, 6 o 1, según las resoluciones (5, 30 y 60 min). Se calcularon en total 6 valores de intensidades: 3 de intensidad promedio y 3 de intensidad máxima. Dichos valores se calcularon para hacer un cruce con las mediciones de  $K_{fs}$  y así poder evaluar la propensión de los suelos estudiados a desarrollar escurrimientos superficiales por exceso de infiltración. Es decir, cuando la intensidad de precipitación (mm h<sup>-1</sup>) rebasa la  $K_{fs}$  (mm h<sup>-1</sup>) y el agua que ya no puede penetrar a la columna del suelo escurre superficialmente hacia áreas de menor pendiente.

## 4.5 Entrevistas a actores clave

### 4.5.1 Selección de actores clave

Para la selección de actores clave a entrevistar, se identificaron las dependencias encargadas de la operación, manejo y toma de decisiones referentes al agua y las áreas verdes en el campus con la finalidad de entrevistar a personas relacionadas directamente con la toma de decisiones. En cuanto al agua se identificaron el Taller de Agua, responsabilidad de la DGOC y el Instituto de Ingeniería. Para las áreas verdes se reconocieron la Dirección de Áreas Verdes y Forestación de la DGOC y la Secretaría Ejecutiva de la REPSA, parte de la Coordinación de la Investigación Científica, UNAM.

Posteriormente, se seleccionaron dos tipos de actores clave: 1) vigentes o que actualmente desempeñan un rol y 2) que han desempeñado algún rol y tienen contribuciones claves en el área. En la Tabla 7 pueden verse los actores claves que se entrevistaron y sus respectivos cargos; se cuenta con el consentimiento de los entrevistados para compartir sus nombres.

**Tabla 7.** Actores claves entrevistados y sus respectivos cargos

<b>Actor clave</b>	<b>Cargo</b>
José Aristeo Sarukhán Kermez	Ex rector de la universidad
Alfredo Martínez Sigüenza	Coordinador de la Dirección de Áreas Verdes y Forestación de la Dirección General de Obras y Coordinación.
Josué Pablo Hidalgo Jiménez	Coordinador del Programa de Manejo, Uso y Reúso del agua en la UNAM.
Rafael Val Segura	Ex coordinador del Programa de Manejo, Uso y Reúso del agua en la UNAM.
Anónimo	Trabajador del Taller de Agua de la Dirección General de Obras y Coordinación.
Luis Zambrano González	Ex secretario ejecutivo de la Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel.
Pedro Camarena Barruecos	Ex trabajador de la Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (encargado del área de Proyectos Especiales y Diseño de Paisaje).

Además de las entrevistas, se realizaron conversaciones informales con el coordinador de la Dirección de Áreas Verdes y Forestación de la DGOC, el coordinador de PUMAGUA y el coordinador de Pumitas para aclarar puntos sobre el CUA-CU e información sobre los suelos del campus (etapas de construcción de canchas deportivas y algunas áreas ajardinadas).

#### *4.5.2 Matriz de preguntas*

Las entrevistas realizadas fueron del tipo estructurada, es decir, siguiendo una guía de preguntas establecidas, y variaron según los actores, partiendo de una misma base (Anexo II) pero diferenciando según las funciones de cada entrevistado. En general, constaron de tres secciones: en la primera sección las preguntas buscaron hacer un breve diagnóstico sobre la operación del CUA en CU; en la segunda se pretendió hacer una evaluación de la existencia o la posibilidad de incorporar un enfoque de GIA en CU; por último, la sección tres fue de identificación de riesgos, buscando analizar cómo entienden, o incluso si perciben, la problemática los entrevistados: si es inherente o no al manejo del agua y áreas verdes. Para el caso particular del ex rector entrevistado, se realizó una cuarta sección cuyo objetivo fue entender el contexto en el que se propusieron y modificaron ciertas cosas durante su rectorado: saber cuáles fueron los mayores obstáculos y aprendizajes.

En la aplicación de las entrevistas, se siguieron las recomendaciones de Hernández Sampieri (2014), por lo que antes de iniciarlas se informó brevemente la finalidad de estas y se pidió el consentimiento para grabarlas. La duración fue de entre 10 y 20 minutos de preguntas por entrevistado, sin embargo, en algunas ocasiones los entrevistados platicaron experiencias o memorias antes o después de las preguntas.

Todas las entrevistas realizadas, exceptuando la del operador de la Red de Agua, fueron grabadas con el permiso de los entrevistados y para su procesamiento fueron transcritas manualmente. Una vez transcritas, se elaboró una matriz para el análisis de cada pregunta.

## 5 Resultados y discusión

### 5.1 Cartografía de coberturas de suelo en Ciudad Universitaria

En la Tabla 8 se muestran los valores obtenidos de las coberturas en superficie (m<sup>2</sup> y ha) y en porcentaje (%). En la Tabla 9 se presenta una comparación entre las coberturas estimadas (m<sup>2</sup>) para el 2002 y aquellas del 2022. En la Figura 15 se muestra el cambio en la superficie ocupada por pedregales remanentes, con respecto a los muestreados en 2012 y los actuales. Por último, en la Figura 16 se presenta la cartografía final de Ciudad Universitaria con las coberturas descritas.

**Tabla 8.** Área (m<sup>2</sup>) ocupada por las coberturas de superficie identificadas y porcentaje de la superficie total que ocupan en Ciudad Universitaria

<b>Cobertura</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Agua	33,149	3.31	0.45
Áreas verdes	1,724,189	172.42	23.52
Cancha	210,288	21.03	2.87
Estacionamiento	662,388	66.24	9.04
Piso	1,611,818	161.18	21.99
REPSA	2,411,041	241.10	32.89
Techo	678,087	67.81	9.25
<b>Total</b>	<b>7330960</b>	<b>733</b>	<b>100</b>

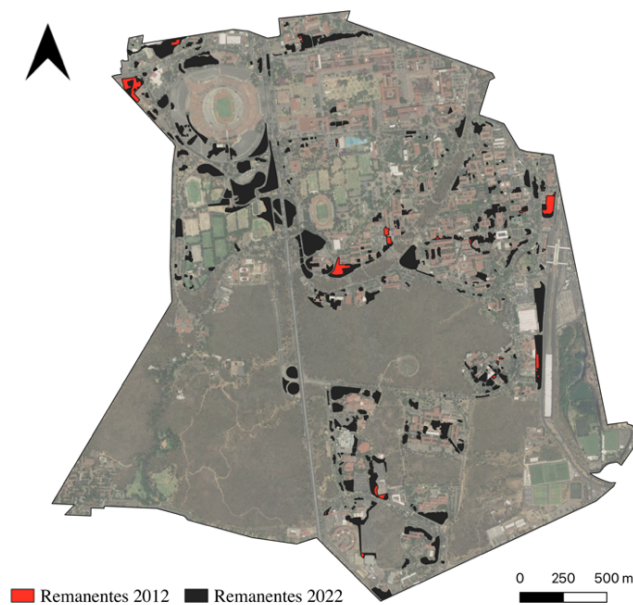
Observando la Tabla 9, es notorio que el mayor aumento ha sido en la categoría de piso (vialidades, banquetas y andadores) con 181,314 m<sup>2</sup> de diferencia entre ambos períodos. Posteriormente le siguen las categorías de techo, estacionamiento, cancha y, finalmente, agua.

**Tabla 9.** Cambio en las coberturas (m<sup>2</sup>) entre los años 2002 y 2022

<b>Cobertura</b>	<b>Superficie 2002 (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Superficie 2022 (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Diferencia (m<sup>2</sup>)</b>
Agua	32,738	33,149	411
Áreas verdes	2,118,350	1,724,189	-394,161
Cancha	162,584	210,288	47,704
Estacionamiento	597,591	662,388	64,797
Piso	1,430,504	1,611,818	181,314
REPSA	2,411,041	2,411,041	0
Techo	578,152	678,087	99,935



Además, puede verse que la expansión de suelo urbano dentro del campus de CU ha significado una pérdida de aproximadamente 394,200 m<sup>2</sup> de áreas verdes, contando con 2,118,350 m<sup>2</sup> de áreas verdes en 2002 contra 1,724,189 m<sup>2</sup> en 2022. La Figura 15 muestra en color negro los pedregales remanentes en 2022 y en rojo aquellos documentados en 2012 que ya no existen. El análisis sobre la pérdida de pedregales remanentes mostró que de los 346,437 m<sup>2</sup> documentados en 2012, para 2022 sumaban 317,971 m<sup>2</sup>; lo que equivale a una pérdida de 28,466 m<sup>2</sup>. Es decir, en 10 años se perdió cerca de un 8% de estos afloramientos rocosos en el campus.



**Figura 15.** Pérdida de pedregales remanentes entre 2012 y 2022

La pérdida de estos espacios es verdaderamente grave por su valor e importancia ambiental, social y geológica: basta con echar un vistazo al acervo digital de la REPSA para tener una idea de la importancia que tiene el ecosistema original. Funcionan como islas de biodiversidad única y puentes de comunicación entre las áreas más extensas de la reserva, se componen de geoformas únicas en su tipo, capturan contaminantes y CO<sub>2</sub>, disminuyen el ruido y la temperatura y recargan el manto acuífero (DGCS-UNAM, 2016). Además, son fundamentales para la educación ambiental y la promoción de la investigación científica, pues al ser físicamente más accesibles, permiten el acercamiento y la apreciación de la comunidad universitaria y demás visitantes al ecosistema de la REPSA, cada vez más aislado por su vulnerabilidad ante amenazas antropogénicas.

# Mapa de coberturas de superficie de Ciudad Universitaria, UNAM.



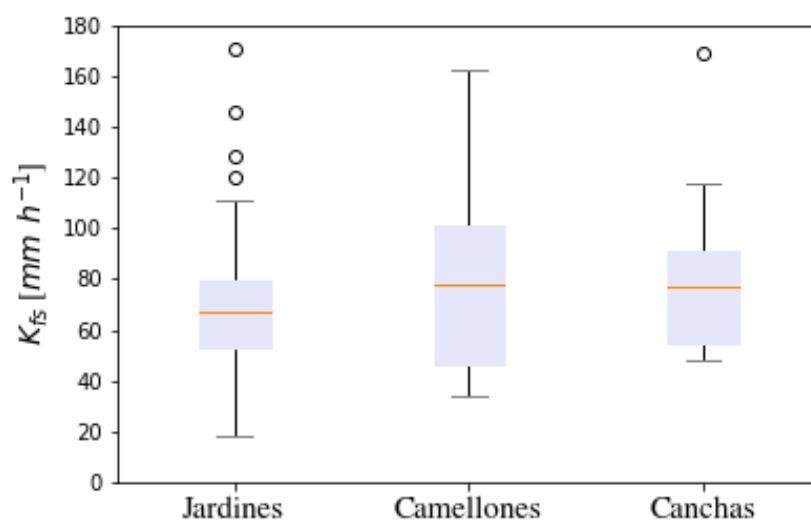
Figura 16. Cartografía final de las coberturas de superficie en Ciudad Universitaria

## 5.2 Infiltración en el campus

Como se mencionó previamente, se realizaron 79 mediciones de infiltración en 27 sitios. De esas mediciones se conservaron 75 y para facilitar su análisis y clasificación, la subcategoría de “áreas verdes” se dividió en jardines y camellones. En la Tabla 10 se presentan los valores promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de las categorías muestreadas y en la Figura 17 se presentan a modo de gráficos de cajas y bigotes para mostrar su dispersión y variabilidad.

**Tabla 10.** Resumen descriptivo de los valores de  $K_{fs}$

Categoría	No. de mediciones	Promedio (mm h <sup>-1</sup> )	Desviación estándar (± mm h <sup>-1</sup> )	Máximo (mm h <sup>-1</sup> )	Mínimo (mm h <sup>-1</sup> )	Mediana (mm h <sup>-1</sup> )
Jardines	38	72.66	32.02	170.31	18.30	67.38
Camellones	21	79.83	37.21	161.87	33.89	78.22
Canchas	16	79.45	33.18	169.27	47.86	76.66



**Figura 17.** Comportamiento de los datos de  $K_{fs}$  obtenidos por categoría

Las pruebas estadísticas mostraron que no hay diferencias estadísticas significativas entre las coberturas de suelo ( $P = 0.719$ ). En la Tabla 10 puede observarse que los valores descriptivos de las tres categorías son similares, teniendo las mayores variaciones en los valores mínimos de  $K_{fs}$ ,

donde la categoría de canchas (CCn) tiene una  $K_{fs}$  mínima de más de dos veces el valor de la de jardines (CJ), mientras que la de camellones (CC) presenta un valor intermedio.

Mientras que la similitud general en las estadísticas descriptivas puede explicarse por el origen de las coberturas, es decir, porque son el resultado de la modificación del paisaje mediante el relleno con cascajo y tierra de monte y la introducción de vegetación externa, la distribución puede deberse a muchos otros factores. Por un lado, el que la CJ sea la de valores menores puede asociarse directamente al grado de uso y el tipo de mantenimiento que recibe: las áreas ajardinadas son las más usadas por la comunidad universitaria, ya sea para esparcimiento o para practicar actividades recreativas. Lo anterior se traduce en el uso continuo de esos espacios, lo que promueve la compactación del suelo e incluso a la pérdida total de la vegetación (en este caso pasto). Ambos factores reducen la  $K_{fs}$ , por un lado porque el agua no puede penetrar fácilmente y la presencia de macroporos es menor y, por el otro, porque el que no haya cobertura vegetal hace que la tierra expuesta sea más vulnerable a la erosión. Asimismo, como lo describe Krieger (2008), las áreas ajardinadas en el campus son el resultado de una larga tradición cultural del paisajismo, donde el césped debe permanecer corto y controlado para cumplir con estándares de “cierta calidad estética”. Las desventajas ecológicas de lo anterior se conocen bien: se requiere mantenimiento e irrigación continua y, además, cada corte evita la autoproducción y reproducción del ecosistema, además de exponer la capa superior del suelo a la erosión.

La alta dispersión y variabilidad de la CC son un reflejo del estado y ocupación de estos espacios. Si bien hay camellones que reciben un mantenimiento continuo y, además, son usados como senderos de paso, como es el caso de los de la Facultad de Ciencias o la Zona Cultural, también hay otros que simplemente pasan desapercibidos, por ejemplo: atletismo e imán. A diferencia de la CJ, estos espacios no siempre tienen mantenimiento y pocos tienen riego, por lo que la cobertura vegetal puede llegar a ser mayor y suele haber especies arbóreas que cubren el suelo de fuertes precipitaciones. El valor de  $K_{fs}$  más bajo de todas las mediciones se obtuvo en el camellón de atletismo, cerca de la pista de calentamiento. Dicho valor se debió a que el sustrato que recubre ese y la mayoría de los camellones de esa zona es un tipo de “compost” con material particulado que presentó propiedades hidrofóbicas, por lo que el agua corría sobre él obedeciendo la pendiente, sin penetrar el suelo.

Con respecto a la CCn, el que su varianza fuera la menor y su valor mínimo de  $K_{fs}$  el más alto de las tres categorías, puede explicarse por diversos factores. En primer lugar y como se explica en la *sección 3.1.2.2.*, este tipo de coberturas tienen una construcción muy particular diseñada específicamente para evitar los encharcamientos: el agua debe desalojarse de manera eficiente para que no haya lugar para el exceso de saturación. En segundo lugar, su uso es controlado y su acceso es restringido, por lo que la cantidad de personas que la usan es mucho menor que en los otros espacios, aunque su uso pueda ser más intenso en determinados períodos de tiempo. Por último, por las funciones que desempeñan, están bajo un régimen de mantenimiento estricto, cumpliendo con un tipo y una altura específica de pasto que si se daña física o biológicamente, es tratado o reemplazado rápidamente. Es importante mencionar que los espacios deportivos dentro de la Universidad están bajo el cargo de diferentes clubes o dependencias. Por ejemplo, las canchas ubicadas en la zona de Cantera Oriente están bajo la dirección del Club Universitario Pumas; aquéllas en la zona deportiva, cerca del Jardín Botánico, bajo la dirección del Club Infantil Pumitas; y las de la zona deportiva del campo central, son responsabilidad de la DGOC. Por lo anterior, el tipo y frecuencia de mantenimiento que recibe cada espacio puede variar y con ello también la  $K_{fs}$ .

### *5.2.1 Infiltración contra precipitación*

En la Tabla 11 se presenta el número de eventos, la precipitación total (mm) acumulada y el evento con la mayor precipitación por cada año estudiado (2014 a 2019). En total, se identificaron 591 eventos de precipitación durante todo el período, la duración promedio de los eventos registrados fue de 314 minutos (aprox 5 horas 15 min) y el evento de mayor duración fue de 3390 minutos (2 días 15 minutos). El evento con la mayor cantidad de precipitación se registró el 9 diciembre del 2018, resultado del frente frío no. 16 de ese año, con una precipitación total de 73.6 mm y una duración de 14 horas y 25 minutos.

**Tabla 11.** Características de los eventos estudiados durante el período seleccionado

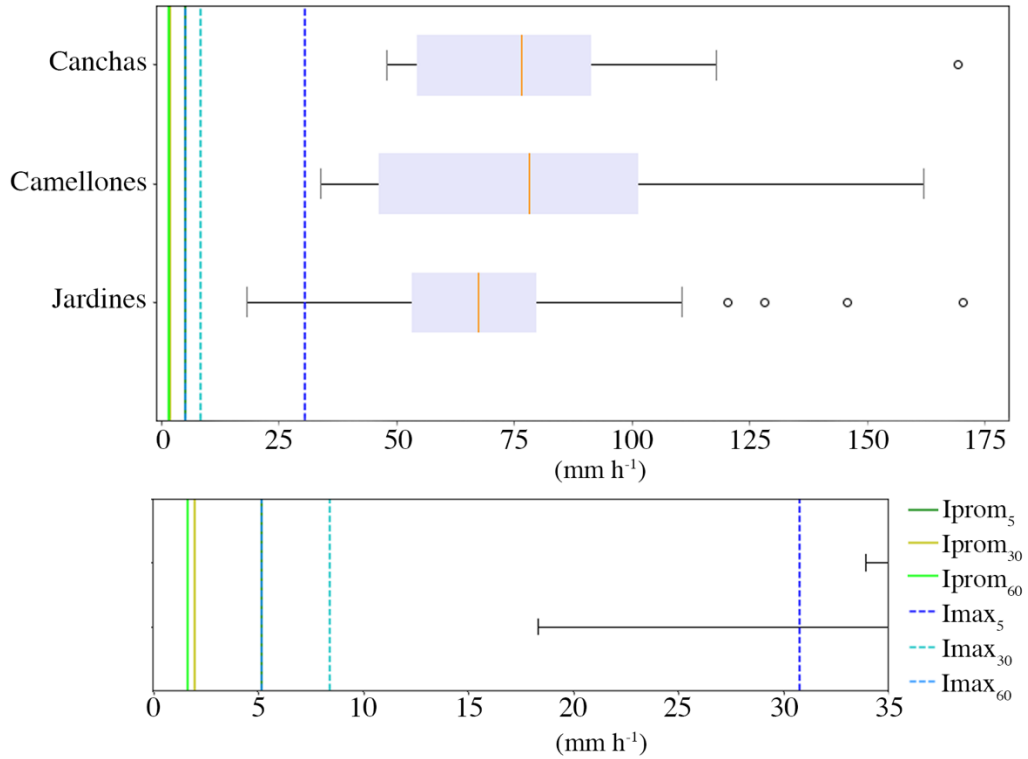
<b>Año</b>	<b>Número de eventos</b>	<b>Precipitación total (mm)</b>	<b>Mayor evento de precipitación (mm)</b>
2014	79	736.2	44.0
2015	101	711.0	34.4
2016	102	696.6	36.8
2017	93	1057.0	52.8
2018	119	1224.0	73.6
2019	97	849.2	40.2

En la Tabla 12 se muestran los promedios de las intensidades máximas y promedio a 5, 30 y 60 minutos. Conocer estos datos es importante para el diseño de sistemas de drenaje y control de avenidas e inundaciones, pues es en eventos de corta duración y alta intensidad que dichos sistemas se saturan y no consiguen desalojar las aguas.

**Tabla 12.** Intensidades máximas y promedio de los eventos de precipitación analizados

<b>Resolución (minutos)</b>	<b>5</b>	<b>30</b>	<b>60</b>
<b>Intensidad máxima (<math>I_{max}</math> [<math>mm\ h^{-1}</math>])</b>	30.76	8.42	5.21
<b>Intensidad promedio (<math>I_{prom}</math> [<math>mm\ h^{-1}</math>])</b>	5.17	2.01	1.67

Estos datos junto con los de conductividad hidráulica ( $K_{fs}$ ) (Figura 17) sirvieron para elaborar la Figura 18 que permite evaluar la posibilidad de generación de escurrimiento superficial por exceso de infiltración, fenómeno explicado más adelante. En la figura se pueden ver dos paneles diferentes: en el superior se presentan los valores de las intensidades de precipitación promedio y máximo a las resoluciones estudiadas y las gráficas de cajas correspondientes a los datos de dispersión y variabilidad de  $K_{fs}$ ; y en el panel inferior se hace un acercamiento a la zona de las intensidades para apreciar mejor la separación de las resoluciones temporales.



**Figura 18.** Infiltración contra precipitación

Como se mencionó, la Figura 18 muestra la susceptibilidad de la superficie infiltrante a generar escurrimiento superficial por exceso de infiltración o bien, por capacidad de infiltración excedida; es decir, cuando la intensidad de precipitación ( $\text{mm h}^{-1}$ ) de un evento de precipitación rebasa la conductividad hidráulica ( $\text{mm h}^{-1}$ ) y al no poder penetrar el agua hacia las primeras capas del suelo, el excedente produce un flujo que escurre sobre la superficie del suelo. Puede verse que en general las tres coberturas estudiadas podrían absorber eventos con las intensidades promedio obtenidas. Sin embargo, para el caso de las intensidades máximas, algunos de los sitios muestreados en las CJ tendrían problemas para amortiguar precipitaciones de intensidades alrededor de los  $30 \text{ mm h}^{-1}$ , tal como puede verse donde la línea punteada se cruza con los bigotes de ambas cajas. El evento que tuvo una intensidad promedio mayor a una resolución de 5 minutos fue de  $93.6 \text{ mm h}^{-1}$ , en julio del 2019. El agua que cae en eventos como este, de corta duración y alta intensidad, no puede infiltrarse en la gran mayoría de las superficies infiltrantes estudiadas, generando escurrimientos y encharcamientos.



En el caso particular de CU, al ser las áreas verdes una especie de islas delimitadas por superficies selladas (banquetas, vialidades, estacionamientos), toda el agua que no pueda infiltrarse durante eventos de precipitación intensa tiene dos posibles rutas: dirigirse hacia hundimientos o sitios más bajos en las mismas áreas, infiltrándose o evaporándose después de un tiempo, o bien, terminar en las vialidades y encauzar hacia el drenaje. Como se mencionó en la *sección 4.1.4.3*, las vialidades en el campus cuentan con lloraderas para dirigir el agua hacia áreas infiltrantes que cumplen la función de vasos reguladores. Sin embargo, no se cuenta con planos sobre sus ubicaciones, ni con mediciones o estudios sobre su funcionalidad. De hecho, si se circula por el campus durante un día lluvioso, pueden verse flujos de agua bajando por las avenidas, entrando a las coladeras o acumulándose en hundimientos sellados, provocando encharcamientos como el que se muestra en la Figura 19.



**Figura 19.** Encharcamiento en la zona deportiva del casco central de Ciudad Universitaria. Foto: Melissa López Portillo

Es importante mencionar que el escurrimiento superficial no se le atribuye únicamente al excedente de infiltración. De acuerdo con Soulis *et al.* (2017) es un proceso que se ve influenciado por factores como el tipo de vegetación, el sustrato, la pendiente y los antecedentes de humedad en el suelo. Asimismo, puede originarse por mecanismos diferentes: excedente de infiltración, exceso de saturación, una combinación de ambos o escurrimiento subsuperficial.



Para este trabajo no se tomaron muestras del suelo para determinar sus propiedades hidrofísicas ni se realizaron mediciones de humedad *in situ* o cálculos de antecedentes de precipitación, por lo que no se hablará de los otros mecanismos.

### 5.3 *Perspectiva Institucional*

A continuación se describen los resultados de las entrevistas realizadas a los siete actores identificados. Es importante mencionar que no todas las preguntas se realizaron a todos los entrevistados, sino que se hizo una selección según el campo de acción, conocimiento y período temporal de cada uno. Por ejemplo, el ex-rector entrevistado prefirió no contestar la sección 1 y solo algunas preguntas de las secciones 2 y 3, sin embargo, se realizó una cuarta sección que sólo fue contestada por él.

#### *Sección 1: percepción de la gestión actual del agua en el campus.*

La primera sección de las entrevistas tuvo como objetivo conocer la opinión de los entrevistados acerca de la gestión actual del agua en el campus CU. La calificación promedio otorgada por ellos a dicha gestión, en una escala del 1 al 10, fue de 4.8, teniendo como calificación más alta 9 y como más baja 1. Tomando como base las seis etapas descritas en la *sección 4.1.4.2*, se identificaron como las etapas más fuertes la captación y la distribución y uso. Por otro lado, en cuanto a la etapa más débil, hubo un consenso señalando al tratamiento, con solo un entrevistado identificando al estado de las tuberías como la parte más débil, componente que acompaña a todas las etapas del CUA-CU.

De igual modo, identificaron algunas limitaciones relacionadas con la gestión del agua en el campus. Por un lado, aquellas que pueden atribuirse directamente a las personas involucradas (desde la toma de decisiones, hasta la operación), como son la falta de capacitación, conciencia e incluso voluntad política. Y, por otro lado, aquellas que podrían entenderse como administrativas: los recursos económicos asignados, la falta de tuberías por la rápida expansión o bien, la disponibilidad inmediata de agua. Otra limitación identificada fue asociada al manejo de áreas verdes, recalando que aún impera una visión “*completamente arcaica y neocolonial*” de éstas, lo

que se traduce en “*jardines hiper costosos, hiper consumistas y con un gran impacto ecológico*”, en palabras de un entrevistado.

En cuanto a las fortalezas, imprescindibles para hacer frente a los retos señalados, los entrevistados resaltaron la independencia que tiene el campus con respecto a la CDMX, consiguiendo una administración personal que permite el mantenimiento continuo y la mejora en la cobertura. Además, señalaron la diversidad de capacidades humanas, es decir, que en el campus hay expertos y expertas de todas las disciplinas, por lo que con cooperación y coordinación, pueden encontrarse soluciones efectivas: “*La principal fortaleza es [que hay] muchas capacidades en todos los institutos, ¿no? [...] De todos lados podríamos sacar capacidades para hacer algo*”.

Por último, contestando la pregunta de “¿quién considera que debe encargarse del manejo del agua en CU?”, los entrevistados coincidieron que, si bien actualmente es la DGOC quien se encarga del manejo y el agua nunca falta, lo ideal sería que la gestión fuera compartida, utilizando términos como “*organismo operador*”, “*organismo colegiado*” y “*grupo colegiado*”. Con lo anterior expresaron la necesidad de que exista un área o dependencia con agencia, recursos asignados e independencia del sindicato, cuyos integrantes provengan de diversas disciplinas y no impere una visión dominada por las ingenierías. Su tarea sería velar por todo lo relacionado con el agua, incluyendo lo económico, social, ambiental y energético, desde una visión de la sostenibilidad.

### *Sección 2: incorporación de una gestión integrada del agua en el campus.*

La sección tuvo como finalidad evaluar la existencia o posibilidad de incorporar un enfoque de GIA en el campus. Para analizar si en el imaginario de los entrevistados existe cierta “integralidad” en cómo perciben el manejo del agua y su relación con las áreas verdes, se les preguntó si a su parecer, la existencia de áreas verdes juega algún papel en el manejo del agua en el campus. Ante esto, hubo un consenso en que sí juega un papel, sin embargo, las respuestas revelaron diferentes perspectivas. Por un lado, se señaló que “*se utiliza mucha agua en el riego*”, utilizando prácticamente las mismas palabras; por otro, se comenzó por distinguir entre la

REPSA y el resto de las áreas verdes, describiendo la primera como *“fundamental para la captación y purificación del agua que alimenta al acuífero somero”*, mientras que a las segundas se les señaló como *“mucho menos funcionales”* y como áreas que *“chupan mucha agua”*, refiriéndose también al gasto en riego. Por último, un entrevistado más mencionó que juegan un gran papel en muchos sentidos *“práctica de deporte, esparcimiento, aspectos psicológicos y gran contribución en el aspecto ambiental”*.

Una parte fundamental de la Gestión Integrada del Agua es que es compartida, no sólo participan y opinan expertos y tomadores de decisiones, sino también los usuarios o población en general. Así, para entender qué tanto están o no de acuerdo con esto quienes toman las decisiones o gestionan el agua en el campus, se les preguntó por un lado si consideran importante que la comunidad universitaria se involucre en el manejo del agua en el campus y, por el otro, cuáles conocimientos o disciplinas consideran más importantes para dicho manejo. Ante la primera pregunta, la mayoría de las respuestas fueron afirmativas, teniendo solo una que no mencionó estar en contra, sino que *“es complicado que la gente se involucre”*, para explicarlo mencionó que *“es una cultura que tiene que empezar desde adentro”*, haciendo énfasis en que lo primero es que el sindicato y las grandes élites universitarias (rectoría y otras dependencias) se responsabilicen. Ahora, las otras respuestas variaron entre un par de *“sí”* a secas, *“obviamente que sí”*, *“es indispensable”* y *“desde luego que sí”*. Con respecto a cómo hacerlo, los entrevistados de PUMAGUA mencionaron que llevan más de 10 años de trabajo en eso, buscando formar *“usuarios hidointeligentes que tengan conocimiento sobre el manejo del agua en la Universidad y que lo lleven a sus comunidades”*; el resto de los entrevistados sugirieron estrategias como orientaciones, recorridos y pláticas, y otras más como materias, cursos introductorios con los protocolos o incluso un propedéutico donde se explique *“el código de ética y las reglas para entrar”*.

En cuanto a la pregunta sobre las disciplinas, los entrevistados dijeron que todas deberían de intervenir: *“algunas quizás con mayor relevancia, pero todas son necesarias”*. En ocasiones se enlistaron las que consideraron principales, destacando aquellas relacionadas con el paisaje, es decir, biología, ecología, geología, geografía, arquitectura; pero también con lo social, como antropología y comunicación.

Se les preguntó también por el plan, programa o proyecto que piensen que ha sido más importante para el manejo del agua en el campus. La finalidad fue identificar y rastrear planes funcionales, pues entender su contexto e implementación permite hacer planteamientos más completos de nuevos proyectos. La respuesta fue casi en su totalidad que el PUMAGUA, describiéndolo como el parteaguas del manejo del agua en el campus. Un entrevistado mencionó que actualmente también puede hablarse de la Red del Agua de la UNAM (RAUNAM) y la Coordinación Universitaria para la Sustentabilidad (CoUS). Por otro lado, el entrevistado que no mencionó al PUMAGUA señaló al programa de control ecológico del campus, incorporado en los años 90 bajo la rectoría del Dr. José Sarukhán.

Con respecto a si consideran que se invierten suficientes recursos (humanos, energéticos y económicos) en el manejo del agua en el campus, en general las respuestas se inclinaron hacia el no. Por un lado, se mencionó que “[...] *en todos lados no se le da la importancia al tema del agua, hasta cuando falta*”, o bien que: “*sí hace falta [invertir más recursos]*”. Por otro lado, se le atribuyó a la administración universitaria actual, señalando que el campus carece de planes maestros con objetivos en el corto, mediano y largo plazo. Para solucionar lo anterior, se sugirió que la Universidad debe marcar prioridades y en función de eso canalizar los recursos. Hubo un único “*sí*”, acompañado de un “*pero están mal [administrados]*”.

Finalmente, hubo un consenso sobre que no creen que pueda hablarse de un manejo integrado del agua en el campus, sin embargo, las respuestas exhibieron diferentes tonos y matices. Hubo “*no*” a secas, pero también “*todavía no, pero hacia allá vamos*”, “*no, pero debería*” y “*no, en absoluto*”.

### *Sección 3: percepción de riesgos y favorecimiento de la eficiencia hídrica.*

Esta sección buscó identificar qué riesgos perciben los entrevistados con respecto al manejo del agua en el campus, así como si son o no únicos de éste y algunas posibles vías para favorecer la eficiencia hídrica en CU. La primera pregunta fue hecha a seis de los siete actores elegidos, destacando como mayor riesgo percibido la escasez hídrica, ya sea por la disponibilidad de las

fuentes naturales, por la vida útil de los pozos o por la contaminación del acuífero, resultado de la mala calidad del agua que se infiltra. También se señaló al resentimiento social como un posible riesgo, pues se sabe que en las colonias al oriente, en el Pedregal de Santo Domingo, el abastecimiento de agua no es continuo. Por lo anterior, se mencionó que de percatarse la cantidad de agua que se utiliza y desperdicia en el campus, la gente podría molestarse y actuar en contra de la Universidad. Sin embargo, también hubo quienes consideraron que no existen riesgos y de haberlos, sería la ruptura de tuberías asociada a movimientos telúricos o crecimiento de raíces. Por último, un entrevistado mencionó que el que no haya riesgos es lo riesgoso, pues como sigue habiendo agua, se sigue extrayendo y desperdiciando en grandes cantidades.

Con respecto a si consideraban que los riesgos identificados eran únicos del campus, algunos mencionaron que si bien los riesgos no son únicos, las condiciones sí: *“son diferentes, pero la consecuencia es la misma”*, *“sí, CU es una burbuja: lo que pasa aquí no pasa afuera.”* y *“en cierta manera sí, porque tenemos un manto muy permeable”*, esta última haciendo referencia a la contaminación del acuífero. Aquéllos que simplemente contestaron que no eran únicos del campus, lo respaldaron por un lado en los movimientos telúricos que suceden en toda la región y, por otro, en cómo la Universidad ha heredado los sistemas y modos de operación del resto del país: *“no, tenemos una ciudad universitaria que es reflejo de cómo mal manejamos la CDMX en términos hídricos”*.

Finalmente, se le pidió a los entrevistados mencionar las tres acciones más efectivas para favorecer la eficiencia hídrica en el campus. Las acciones que mencionaron pueden clasificarse en tres campos: ambiental, social y técnico. Dentro del campo ambiental se mencionaron el cambio y restauración de áreas verdes, recuperando espacios con vegetación nativa que no necesite riego. En cuanto a lo social, se mencionaron campañas y programas de concientización y monitoreo, así como fomento a la participación de la comunidad. Finalmente, en lo técnico se mencionó el fortalecimiento del tratamiento y reúso del agua, la regulación de presiones y fugas para la recuperación de caudales y el cambio de infraestructura para la captación. Un entrevistado lo resumió todo con *“meter más tecnología, dinero y voluntad”*.

#### *Sección 4: experiencia adquirida en la incorporación de medidas ambientalmente responsables.*

Como se mencionó en un inicio, esta sección sólo fue respondida por el ex-rector entrevistado. Las preguntas tenían como objetivo entender el contexto en el que se propusieron y modificaron ciertas acciones con repercusiones ambientales durante su rectorado, en los años 90. De igual modo, buscaron identificar las dificultades administrativas, operacionales y los obstáculos en la implementación de dichas medidas ambientalmente responsables.

Según el entrevistado, la gestión de modificaciones tales como la incorporación de un sistema de compostaje, la conducción del agua en azoteas a grietas de infiltración y el programa de control de eucaliptos, no fue complicada: *“yo creo que si hubiera sido muy complicada, el director de Obras no lo habría hecho”*. Además, atribuye varios de los avances al interés de dicho director que, en sus palabras: *“era muy sensible a esto”*, asegurando, por ejemplo, que la idea de la conducción de agua fue del director y que él solo la apoyó. Otra cosa que agregó al respecto fue que el interés, la sensibilidad y el *“don de gentes”* del director lograron generar un sentimiento de cooperación entre los trabajadores: *“El hecho de que él tuviera interés y que además animara a la gente a esto, porque además [tenía] un don de gentes enorme... A mí me da la impresión de que sí [...] había generado un sentimiento de «sale, qué bueno, sí vamos a hacerlo»”*.

Con respecto a los principales obstáculos a los que se enfrentó para alcanzar un manejo más sostenible en el campus, el ex-rector sólo señaló la falta de conocimiento que había en ese momento. Por ejemplo, hablando de la obtención de energía a través de celdas fotovoltaicas dijo: *“si hubieran habido esas medidas en ese tiempo, hubiera sido algo muy atractivo para hacer, pero no existían, no habían esas tecnologías...”*.

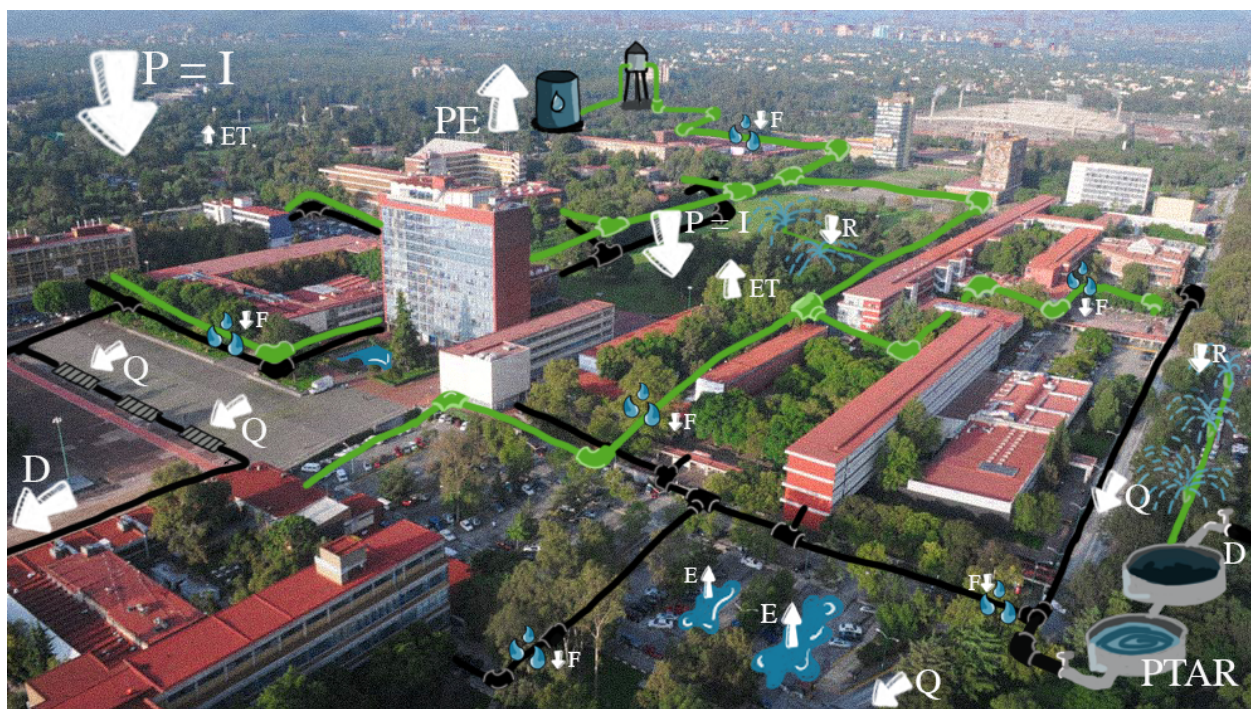
Por último, el entrevistado opina que en la búsqueda de la sostenibilidad en el campus es indispensable involucrar más a la comunidad en cosas que sean sensatas y realmente complementarias a su educación. En este sentido, puso el ejemplo de campañas de recolección de basura en el espacio escultórico, donde además de recuperar el espacio, se logró que los estudiantes tuvieran un vínculo directo con el campus, un estilo de *“a ver, vamos a cuidar la casa”*.

## 5.4 Cerrando el Ciclo Urbano del Agua en Ciudad Universitaria

En la *sección 3.2 y 4.1.4* se habló sobre los componentes del Ciclo Urbano del Agua y se realizó una breve descripción sobre la parte operacional de éste en CU. Esta sección tratará de hacer un cierre del CUA-CU considerando no sólo los aspectos operacionales previamente mencionados, sino también la parte hidrológica.

### 5.4.1 Componentes

En la Figura 20 se esquematizan los componentes del CUA-CU. Es importante mencionar que de ninguna manera pretenden representar la ubicación real de las tuberías, pozo de extracción, tanque y demás infraestructura hidráulica del campus: su función es meramente ilustrativa.



**Figura 20.** Componentes del Ciclo Urbano del Agua en Ciudad Universitaria. Donde: D = drenaje de la CDMX; E = evaporación; ET = evapotranspiración; F = fuga; I = infiltración; P = precipitación; PE = pozo de extracción; PTAR = planta de tratamiento de aguas residuales; Q = escurrimiento superficial; R = riego. Los tubos verdes representan la red de agua potable y los tubos negros la de aguas negras. Foto: Archivo Gaceta UNAM (Gaceta UNAM, 2022)

Como se mencionó anteriormente, CU cuenta con tres pozos de extracción de agua potable que abastecen a tres tanques de almacenamiento y una red de conexiones directas a la red de agua potable. El agua abastecida se distribuye a los diferentes recintos del campus para su uso y consumo y una vez utilizada, es recolectada y dirigida por una red de drenaje hacia alguna de las PTAR. Idealmente, el agua es tratada y posteriormente utilizada para el riego de áreas verdes. El agua que no es tratada o utilizada (actualmente prácticamente toda), se desaloja a través de la red de drenaje público de la CDMX. Durante el proceso de distribución, el agua es potabilizada y su calidad es monitoreada en diversos puntos.

Sin embargo, el ciclo no se compone únicamente de lo anterior; simultáneo a la parte operacional, ocurren diversos procesos hidrometeorológicos: hay precipitación, evapotranspiración en las áreas verdes y evaporación de los cuerpos de agua y encharcamientos. Así, podrían dividirse los componentes según si son entradas o salidas de agua al sistema. Para este trabajo las entradas y salidas son definidas a partir de las fuentes subterráneas.

### *Entradas*

Referente a los procesos o componentes que ingresan agua al sistema bio-hidro-físico del campus, esto es, al suelo, vegetación y acuífero, se pueden identificar 3 componentes: *precipitación, fugas y riego*. Los tres componentes mencionados dependen de la *capacidad de infiltración* de las superficies infiltrantes para poder recargar el acuífero. Como se ha mencionado en ocasiones anteriores, por las condiciones geológicas y biofísicas de la REPSA, prácticamente toda el agua que precipita sobre ella se infiltra y percola hacia el acuífero. Más específicamente, Canteiro *et al.* (2021) estimaron una  $K_{fs}$  de 274.58 mm h<sup>-1</sup> en la REPSA; considerando los datos de intensidad de precipitación reportados en este trabajo, ningún evento en CU podría rebasar dicho valor.

Con respecto al resto de las áreas verdes, que en este trabajo se clasificaron como jardines, camellones y canchas, en general tuvieron  $K_{fs}$  capaces de amortiguar la gran mayoría de eventos de precipitación que recibe el campus y, probablemente, de infiltrar los volúmenes de agua provenientes de las fugas.



Si bien podría parecer conveniente la entrada “extra” de agua por fugas y riego, en realidad implican un gasto energético muy grande por el bombeo del agua, así como una fuente de contaminación al acuífero, pues las fugas también provienen de las tuberías de aguas negras. De acuerdo con PUMAGUA (Informes PUMAGUA, 2008-2020), del volumen extraído en CU se pierde en promedio 41.5% en fugas y 26.0% en riego. Considerando que se extraen 2,984,700 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de agua de los pozos de extracción del campus, cerca de 1,239,330 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> se desperdician en fugas, sin contar aquellas de aguas negras o drenaje directo a grietas, y aproximadamente 776,290 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> se utilizan en riego; lo equivalente a cerca de 120 y 190 albercas universitarias, respectivamente.

### *Salidas*

En este caso los componentes son: *extracción, drenaje y evapotranspiración*. De los pozos de extracción se extraen cerca de 2,984,700 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de agua del acuífero para su uso en el campus. Como se discutió a lo largo del trabajo, actualmente solo una de las PTAR en CU está funcionando y no lo está haciendo a su capacidad óptima. Por lo anterior, las aguas residuales y los volúmenes pluviales que no alcanzan a infiltrarse y/o que escurren por las superficies selladas, son desalojados de CU a través de la red de drenaje, exportando el agua hacia otro sistema y evitando la recarga del acuífero.

Como se describe en la *sección 3.2* la evapotranspiración (ET) en el CUA comprende también a la evaporación de superficies selladas. En el caso de CU, la evaporación ocurre principalmente en los cuerpos de agua (Cantera, fuentes, alberca olímpica) y en los encharcamientos en superficies selladas que se acumulan durante la época de lluvias o durante el riego de las áreas verdes (Figura 20, por ejemplo). No se tiene una estimación de su porcentaje o volumen aproximado. Por su parte, el resto de la ET sucede en la REPSA y las demás áreas verdes, diferenciadas entre sí por sus características geológicas, edafológicas y biológicas. Canteiro *et al.* (2021) explican que la ET promedio en la REPSA es de aproximadamente 0.7% de su precipitación, lo que quiere decir que prácticamente toda el agua que cae en dicha área puede infiltrarse y recargar el acuífero.

Con respecto al resto de áreas verdes, Arellano-Leyva (2023) estimó la ET potencial ( $ET_0$ )<sup>4</sup> en CU con datos meteorológicos de las estaciones ICAYCC y CCHsur y la ecuación de Penman-Monteith. En su modelo utilizó como cultivo de referencia un pasto de 12 cm de altura sin limitaciones de agua, es decir, bien regado todo el año, y obtuvo un valor promedio de 3.7 mm d<sup>-1</sup>, es decir, 1350 mm al año, magnitud que rebasa la precipitación anual promedio del sitio. Cabe aclarar que este valor es el máximo de  $ET_0$  y que podría estar sobreestimado. Este dato indica que, muy probablemente, la recarga de acuíferos en este tipo de superficies puede ocurrir únicamente en los eventos que la precipitación rebasa los 3.7 mm; para el 2019, por ejemplo, serían 59 de los 97 eventos registrados y para el 2018, 85 de los 119.

Si bien sería interesante hacer el cálculo del balance hídrico para conocer el almacenamiento neto y flujos de agua en el sistema, no es posible con la información que se tiene actualmente. Para hacer el balance sería necesario conocer con exactitud los volúmenes de agua que se tratan y se reutilizan, aquéllos que se exportan directamente al drenaje de la CDMX y los correspondientes a las aguas negras que se infiltran directo a grietas. De igual modo, sería preciso hacer un cálculo de la ET real en las diferentes coberturas del campus.

## 5.5 ¿Un cambio paradigmático?

### 5.5.1 Situación actual

Si bien el agua no parece faltar en el campus gracias al arduo trabajo de los operadores, puede decirse que su manejo es problemático. La calificación promedio otorgada por los entrevistados fue de 4.8, un número que además de ser reprobatorio, demuestra la inconformidad incluso de aquellos relacionados a su gestión. El hecho de que las etapas más fuertes identificadas fueran la captación (extracción) y distribución-uso y la más débil el tratamiento, demuestra la relación utilitarista que hasta hoy en día predomina no solo en la UNAM, sino en la mayor parte del país. Relación que nos ha llevado a un estado general de crisis.

---

<sup>4</sup> La Evapotranspiración Potencial es una medida de referencia que indica la cantidad máxima de agua que puede evaporarse en un clima específico y una cubierta vegetal sin limitaciones de agua.

Cuando se habló de un manejo integral del agua en el campus, todos los entrevistados coincidieron en los elementos básicos: es fundamental que la comunidad universitaria se involucre, así como que haya participación de expertos y expertas de todas las disciplinas. Finalmente, el manejo bajo un esquema colectivo de cooperación y toma de decisiones compartida es fundamental. Sin embargo, desde hace varias décadas la gestión del agua ha sido una tarea compartida entre la DGOC, área que por cierto se compone mayormente de ingenieros, y el Instituto de Ingeniería. En la entrevista con el ex-rector mencionó lo siguiente:

*“La otra cosa que ya existía cuando me hice cargo de rectoría era la planta de tratamiento de aguas [...], yo nunca llegué a entender bien bien, porque me daban datos muy diferentes de qué tan eficaz era: unos me decían que era enormemente eficaz y otros que no servía”.*

Al preguntarle si entonces revisaba algo relacionado con las PTAR del campus contestó:

*“No, eso era casi propiedad del Instituto de Ingeniería y además eran bastante impermeables a cualquier interacción con ellos”.*

Incluso durante la investigación de las etapas del CUA-CU se le solicitó a PUMAGUA información sobre las PTAR y sobre la ubicación de los pozos de absorción, sin embargo, no pudieron compartirla porque era información que tenía la DGOC. Al pedirla a DGOC, se señaló que la tenía PUMAGUA. Lo anterior más que conclusiones, genera preguntas que no podrán contestarse más que con suposiciones personales.

Otro punto de encuentro entre los entrevistados fue que el esquema actual de manejo de áreas verdes, herencia de una tradición paisajística europea (Krieger, 2008), consume mucha agua y requiere mucho mantenimiento. Al respecto, pueden discutirse una serie de acciones para mejorar la situación, tema que se hará en la siguiente sección. Lo que sí se discutirá a continuación son las cifras de las pérdidas de superficies verdes y el posible panorama futuro si las cosas se siguen haciendo como hasta ahora.

Los análisis de cambio de superficies realizados demostraron que se ha perdido cerca del 20% de áreas verdes durante los últimos 20 años y aproximadamente 8.2% de pedregales remanentes en la última década. A pesar de eso, el agua potable utilizada para riego se ha mantenido constante, ocupando cerca del 26% del volumen total extraído, de acuerdo con datos de PUMAGUA (Informes PUMAGUA 2008-2020). Que haya menos áreas verdes y aún así el riego sea el mismo puede tener diferentes explicaciones: la primera es que las áreas verdes que se han perdido no recibían mantenimiento ni riego, pudiendo o no ser remanentes de pedregal o zonas de transición de la REPSA. La segunda es que los sistemas y prácticas asociadas al riego (horarios y volúmenes) requieren modernización y concientización, tal como se señaló por algunos de los entrevistados. Si bien gracias al trabajo del PUMAGUA se logró una reducción del volumen del riego a través de la modernización del sistema, dichos avances se perdieron con el abandono de la infraestructura que acompañó a las medidas de aislamiento social por la pandemia del SARS-CoV-2 (J. Hidalgo, comunicación personal, 22 de noviembre de 2023).

Regresando a las cifras de pérdidas de cobertura, si las decisiones que se toman en el campus siguen la misma tendencia, favoreciendo la expansión del suelo urbano, acompañada del sellamiento, sobre la permanencia de superficies infiltrantes, para el 2050 la reducción total de áreas verdes corresponderá al 50% de áreas verdes con respecto a aquellas existentes en el año 2000. Si bien la matrícula escolar sigue en aumento (55.7% durante los últimos 20 años, de acuerdo con la Gaceta UNAM, 2023), es menester establecer como prioridad la permanencia, cuidado y restauración de áreas verdes y demás espacios infiltrantes. Solo así será posible hacer frente a la crisis hídrica y climática a la que nos enfrentamos. En este sentido, aquellas áreas verdes que se consideran “zonas de desarrollo controlado” (Figura 2) deberán de comenzar a verse como futuras zonas de protección, además, la expansión del suelo urbano sobre ellas debe frenar en la medida de lo posible.

Ahora, si se pretendiera evaluar la implementación de un enfoque de GIA en el campus, siguiendo lo indicado en la Figura 1, que establece los umbrales descriptivos para la evaluación del ODS 6.5.1, y a partir de las respuestas dadas por los entrevistados, probablemente sería un “muy bajo”. Por los planes y programas que identificaron los entrevistados, quizás durante la implementación del Programa de Control Ecológico del Campus (PCEC), en los años 90, y

cuando se creó PUMAGUA, en el 2009, el campus pudo haberse encontrado en un estado de implementación un nivel arriba, en la categoría de “bajo”. De igual modo, por los comentarios que hizo el ex-rector sobre la sensibilidad del Director de la DGOC de su administración, parecería que en CU se responde bien a nuevas ideas o estímulos; por lo menos cuando provienen de personas con fuerte liderazgo y capacidad de mediación. No obstante, por el estado de estancamiento actual, en donde no se le dio continuidad ni registro a los avances del PCEC y tras el recorte de presupuesto y personal de PUMAGUA, puede ser que el problema no sea la implementación, sino el seguimiento.

### *5.5.2 Reflexiones*

Hablar de un paradigma engloba las creencias, supuestos, valores y prácticas, así como la interpretación de la realidad, el abordaje de problemas y el desarrollo de soluciones. En esta última sección se plantean algunas de las muchas estrategias de GIA que podrían aplicarse o se están aplicando en el campus para mejorar nuestra (como comunidad universitaria) relación con el agua. Cabe destacar que varias de estas estrategias fueron también mencionadas por los entrevistados como medios para aumentar la eficiencia hídrica en el campus y que más que plantear cómo aplicarlas, pretenden servir más bien como una base para sembrar interés y curiosidad.

### *La toma de decisiones*

Teniendo presentes los principios básicos de la GIA: la responsabilidad compartida, la protección de los ecosistemas y el gobernar sabiamente; y retomando una idea sugerida por tres de los entrevistados, se hablará brevemente sobre la creación de un organismo operador de agua (OOA) en el campus.

Cabe aclarar que no es la primera vez que esto se propone. Marini (2012) planteó una estrategia para conformar un OOA en CU. La autora propuso una reestructuración en la DGOC, sugiriendo la creación de una nueva dirección llamada “Dirección de Agua y Saneamiento” con dos

departamentos: “Abastecimiento de Agua” y “Aguas residuales”. Si bien este es un primer acercamiento, no es precisamente lo que se propone aquí.

La idea de un OOA en CU cumple precisamente con los principios previamente mencionados. Tendría que ser, como lo sugieren los entrevistados, un organismo independiente, no adscrito a la DGOC, con un lugar en el Comité de Análisis para las Intervenciones Urbanas, Arquitectónicas y de las Ingenierías en el Campus de la Universidad. Debería estar compuesto por un grupo transdisciplinario de expertos y expertas en diferentes temas y contar con un comité para la toma de decisiones informadas. Sus funciones serían, además de aquellas asociadas al CUA-CU, velar por la protección del ambiente, específicamente por la de la REPSA y el acuífero somero; administrar y gestionar recursos económicos y energéticos; elaborar planes de desarrollo con metas a diferentes plazos temporales; y promover la educación e investigación de temas relacionados con el agua en el campus. Algunas de las ventajas relacionadas serían el aumento en la eficiencia operacional e hídrica, la transparencia en la toma de decisiones y uso de recursos y la comunicación continua con la comunidad universitaria.

Como se dijo previamente, la GIA no busca de ninguna manera destruir e ignorar lo que ya existe, sino integrarlo y mejorarlo. Así, este organismo podría tomar lo aprendido y contar con la presencia de miembros del PUMAGUA, la RAUM y la CoUS; incluso fusionar las primeras dos.

### *Sobre las superficies selladas*

Las decisiones relacionadas con el ahorro de agua y la eficiencia hídrica en el campus han sido propuestas y tomadas desde una visión de incorporar o reemplazar infraestructura: nuevo inmobiliario en los baños, extensión de la red de tuberías, nuevos sistemas de riego automatizado, entre otros. PUMAGUA nació con la meta de reducir en un 50% el consumo de agua en CU y en sus más de 10 años de trabajo demostró haber conseguido un ahorro significativo de agua. Sin embargo, una lucha constante y que no ha logrado conquistar es la de las fugas: durante los años 2008-2020, cerca del 41.5% ( $1,239,330 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ ) del volumen extraído se ha perdido en fugas (Informes PUMAGUA, 2008 a 2020). Su estrategia de válvulas y presiones ha funcionado bien, pero no ha sido suficiente.

Dos de los entrevistados sugirieron como solución a las problemáticas asociadas con el manejo del agua el “*cerrarle a la llave*”. Partiendo de lo anterior, ¿qué pasaría si se dejara de depender en su totalidad de los pozos de extracción y se incorporaran alternativas integrales que aprovecharan la infraestructura existente y fuentes alternas?

Actualmente, CU cuenta con aproximadamente 2,952,300 m<sup>2</sup> de áreas selladas, lo correspondiente al 40.3% del campus. De ese porcentaje, el 9.3% es de techos, 9% de estacionamientos y 22% del resto de áreas selladas, es decir, banquetas, andadores, vialidades, entre otros.

Si el 60% de las superficies ocupadas por *techos* se destinaran a la captación de agua de lluvia, podrían recolectarse aproximadamente 327,450 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de agua, considerando la precipitación anual reportada para CU. Este número ya toma en cuenta la retención promedio del 4% que tienen las azoteas convencionales en CU (Arellano-Leyva, 2017; Arellano-Leyva *et al.*, 2021). El agua recolectada podría utilizarse para cubrir una tercera parte de la demanda para consumo humano en el campus o bien, cerca de la mitad del agua que se destina a riego. El 40% restante podría destinarse en un 20% a la recarga directa por direccionamiento a grietas, garantizando una infiltración de 109,240 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>. Por último, algún porcentaje del 20% restante podría destinarse o utilizarse para SbN como azoteas verdes, cuyos beneficios van desde la mitigación de ruido y la captación de contaminantes, hasta el control de avenidas y provisión de hábitat. Estudios realizados en CU (Arellano-Leyva *et al.*, 2017; Arellano-Leyva *et al.*, 2021; Cano-Vázquez, 2021; Velasco-Tapia, 2022) demuestran su efectividad, con una retención promedio del 60% del agua precipitada y la captura de diversos hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), metales pesados y compuestos precursores de lluvia ácida.

Las áreas selladas a nivel piso cubren aproximadamente 1,611,820 m<sup>2</sup> del área de CU. Si el 60% de su superficie se dirigiera de manera planificada a pozos de infiltración, podrían ingresar cerca de 967,090 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de agua en el campus. La planificación en este tipo de alternativas es fundamental porque permite, por ejemplo, identificar las áreas con menos exposición a contaminantes. Márquez-Sánchez (2016) realizó un estudio de calidad y tratamiento de agua de

lluvia de recarga de los pozos de absorción existentes desde los 90 en el campus. En su trabajo evaluó la calidad del agua de lluvia que escurría hacia dichos pozos y encontró que diversos parámetros no cumplen con la NOM-015-CONAGUA-2007. Ante esto, sugirió un tratamiento de rejillas y sedimentador primario, funcional para retener microorganismos patógenos y evitar la colmatación de los pozos, así como un mantenimiento continuo. Entonces, si se quisiera implementar la recarga de acuíferos por pozos de absorción en el campus, sería imprescindible contar con los filtros adecuados para no comprometer el acuífero somero con agua de mala calidad.

Con respecto al área ocupada por *estacionamientos*, si tan solo el 20% de ésta fuera sustituida por concreto permeable u otras superficies infiltrantes, podrían ingresar cerca de 111,280 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de agua. Aumentando al 60% serían 333,850 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>. Al igual que en los pozos de absorción, en estas superficies debería garantizarse la calidad del agua que se infiltra.

#### *Tratamiento de aguas residuales*

Considerando los volúmenes de diseño de las PTAR existentes en el campus (Tabla 8), si todas operaran a su máxima capacidad, podrían tratarse 48 l/s de aguas residuales, lo equivalente a 1,513,840 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>. En el caso de que sólo pudiera rehabilitar la PTAR-CA, cuyo volumen de diseño son 40 l/s, serían cerca de 1,261,440 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>. En cualquiera de los dos escenarios, se obtendrían suficientes aguas residuales para cubrir la demanda de riego (776,290 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>) y el resto podría servir para limpiar instalaciones o para la descarga de inodoros.

Por otro lado, todos aquellos lugares que no están conectados a la red de drenaje deberían tratar sus aguas a través de SbN, como humedales artificiales. Incluso los espacios ocupados por las PTAR-CPS y E12, de no ser restauradas, podrían destinarse a lo mismo. Los humedales artificiales son alternativas diseñadas y construidas para llevar a cabo procesos naturales en ambientes controlados (Vymazal, 2011). Hay diferentes tipos y sus capacidades de procesamiento de agua (l/s) varían dependiendo su diseño, tamaño, vegetación, condiciones ambientales locales, entre otros factores. En CU ya hay un humedal artificial funcionando y otro en construcción. El primero se encuentra en la Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra (ENCiT), tiene una



capacidad de 600 l/d (0.007 l/s) y, además, es un proyecto educativo que está a cargo de los alumnos (Gaceta UNAM, 2023b). El segundo se encuentra en la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales y es gestionado y financiado por la CoUS, mientras que su implementación está a cargo de GAIA, un grupo académico interdisciplinario de la Facultad de Química UNAM (<http://gaia.quimica.unam.mx/>). Proyectos a pequeña escala como estos, facilitan la operación de los sistemas y la supervisión de la calidad del agua, pues cada dependencia se responsabiliza de su seguimiento, además de fomentar el interés y la participación de la comunidad universitaria.

### *Restauración y cambio de áreas verdes*

Como se ha dicho repetidas veces en este trabajo, los jardines que han sido modificados en el campus requieren mucho mantenimiento y mucho riego. Camarena (2010) describe que las áreas ajardinadas del campus, además, tienen más horas hombre, más desperdicios orgánicos y menos biodiversidad. Por ello, sugiere una estrategia de restauración llamada “xerojardinería”, que consiste en repoblar las áreas verdes con especies locales y remover aquellas exóticas o invasoras, incluso tiene una guía para “la transformación de un jardín” (Camarena, 2010, pp. 46-49).

De acuerdo con información de PUMAGUA (2017), 1,541,400 m<sup>2</sup> de áreas verdes son regadas en el campus, incluyendo canchas deportivas. Esto quiere decir que cerca de 1,331,110 m<sup>2</sup> son áreas verdes ajardinadas que necesitan riego, cerca de un 77%. Si se sustituyera la mitad de esas áreas en un esquema de xerojardinería, es decir, 665,550 m<sup>2</sup> (aprox. 43% de las áreas regadas totales), podrían ahorrarse cerca de 333,740 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> del agua que se utiliza en riego. Lo anterior, además, no afectaría a las áreas deportivas ni los principales espacios de esparcimiento (Las Islas y jardines centrales de las facultades). Asimismo, si el porcentaje que se mantiene ajardinado tuviera cambios en la frecuencia y grado de poda, se protegería el suelo y habría un aumento en el porcentaje de humedad disponible para las plantas.

Además de la sustitución de jardines, una alternativa que permite recuperar los bienes y funciones ecosistémicas de las áreas verdes es la restauración. En el caso particular de CU, se trata de la restauración de pedregales. Este ejercicio lleva años funcionando en el campus, tanto mediante el

programa de adopción de áreas colindantes “PROREPSA” de la REPSA (SEREPSA, 2008), como a través de proyectos impulsados por los institutos, como el del Geo-Pedregal de los institutos de Geología y Geografía, con cerca de 10 años de antigüedad (para más información revisar IG-UNAM, s.f. y Gaceta UNAM, 2022). Asimismo, desde finales del 2022, la CoUS está dirigiendo la limpieza y restauración de un camellón ubicado entre la DGAE y el Geopedregal bajo un proyecto de creación de comunidad, apropiación del espacio y visibilización de problemáticas comunes en los espacios universitarios (contaminación, actividades ilícitas, entre otras)(CoUS, s.f.).

## 6 Conclusiones

Si la implementación de las alternativas desarrolladas previamente se llevara a cabo en la medida propuesta, sumarían  $3,332,815 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  de agua, esto es 11.5% más agua de la que se extrae de los pozos de extracción del campus. De esta cantidad,  $1,410,185 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  serían de recarga al acuífero somero,  $1,588,890 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  estarían disponibles para su uso, ya sea en riego o en limpieza, y los  $333,740 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  restantes se ahorrarían del riego. En el caso de que se aplicaran en un 20% o en un 80% las medidas, excepto la operación de la PTAR-CA que tiene que estar a su capacidad de diseño, serían  $1,995,880 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  y  $4,162,780 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ , respectivamente. Cualquiera de estas cantidades representaría menos presión al acuífero somero que se recarga en CU y que abastece gran porcentaje de la zona sur de la CDMX.

Por otro lado, la restauración de la relación que como comunidad universitaria tenemos con el agua y las áreas verdes de nuestro campus es tan importante como todo lo anterior. El involucramiento y la participación de los y las usuarias serán clave en el fortalecimiento de una Gestión Integrada del Agua en CU: de nuestra capacidad de entender la realidad, identificar sus problemáticas y proponer soluciones funcionales que no comprometan más el medioambiente, depende que logremos el cambio paradigmático necesario para combatir la crisis a la que nos enfrentamos. Ese cambio necesitará que deje de verse al agua como un producto desechable, a las áreas verdes como espacios sustituibles y que el entendimiento y protección de ambas determinen la agenda universitaria.

Por último, a partir de lo encontrado en este trabajo, se propusieron algunas estrategias que podrían funcionar para impulsar la Gestión Integrada del Agua en CU. Primero, se sugirió la creación de un organismo operador del agua en el campus con independencia administrativa y operacional, pero que trabaje en conjunto y a partir de las dependencias ya existentes y sus avances. Después, se plantearon diferentes alternativas a implementarse en torno a su uso y manejo y se estimó la cantidad de agua ( $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ ) que podría aportarse a la recarga del acuífero, utilizarse para consumo o bien, simplemente ahorrarse. Por lo tanto, se comprobó que a partir del conocimiento y entendimiento del CUA en CU, fue posible proponer estrategias y alternativas que encaminen al campus hacia una Gestión Integrada del Agua.

## Referencias

- AMCOW (2018). 2018 Status Report on the Implementation of Integrated Water Resources Management in Africa: A regional report for SDG indicator 6.5.1 on IWRM implementation.
- Arellano-Aguilar, O. (2023). Situación actual de la contaminación en el Alto Atoyac-Zahuapan: estado de emergencia. *La Jornada del Campo*, no. 186. Disponible en: <https://www.jornada.com.mx/2023/03/18/delcampo/articulos/atoyac-zahuapan-emergencia.html>
- Arellano-Leyva, E., Hernández-Quiróz, M., Huerta-Guzmán, R. G., y Collazo-Ortega, M. (2017). Extensive green roofs as means to capture polycyclic aromatic hydrocarbons. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 37(4), 280–291. <https://doi.org/10.1080/10406638.2015.1105827>
- Arellano-Leyva, E.A., López-Portillo, M., Muñoz-Villers, L. E., y Prado-Pano, B. L. (2021). Rainfall retention and runoff generation processes in tropical mature green roof ecosystems. *Hydrological Processes*, 35(11). <https://doi.org/10.1002/hyp.14382>
- Bañuelos Díaz, J. (2021). Cerrando el ciclo urbano del agua. *Perspectivas IMTA*, 2(15). <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-15>
- Boretti, A. y Rosa, L. (2019) Reassessing the projections of the World Water Development Report. *Clean Water* 2(15), 6.
- Cacal, J.C., Taboada, E.B., Mehboob, M.S. (2023) Strategic Implementation of Integrated Water Resource Management in Selected Areas of Palawan: SWOT-AHP Method. *Sustainability*, 15, 2922. <https://doi.org/10.3390/su15042922>
- Cano-Vázquez, G. (2021). Evaluación del desempeño de azoteas verdes extensivas en la retención de contaminantes, Ciudad de México. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional – TESIUNAM.
- Canteiro, M., Olea, S., Escolero, O., y Zambrano, L. (2019). Relationships between urban aquifers and preserved areas south of Mexico City. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.12.007>
- Castellanos Vargas, I., N. E. García Calderón y Z. Cano Santana (2017). Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: atributos para su conservación. *Terra Latinoamericana* 35: 51-64.
- Castillo Argüero, S., Martínez-Orea, Y., Nava-López, M. y L. Almeida-Leñero. (2016). El matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y sus servicios ecosistémicos. En: *La biodiversidad en la Ciudad de México*, vol. iii. CONABIO/SEDEMA, México, pp.50-69.
- Castillo Argüero, S., Montes Cartas, G., RomeroRomero, M. A., Martínez Orea, Y., Guadarrama Chávez, P., Sánchez Gallén, I., y Núñez Castillo, O. (2004). Dinámica y conservación de la flora del matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (D.F., México). *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (74), 51-75.

- Cázares Venegas, J.J. (2014) *Calidad del agua de reúso: generación-almacenamiento-distribución, posterior a la renovación de la planta de tratamiento “Cerro del agua”*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México] Repositorio institucional – TESIUNAM.
- Chen, H., Huang, J. J., Dash, S. S., McBean, E., Wei, Y., y Li, H. (2022). Assessing the impact of urbanization on urban evapotranspiration and its components using a novel four-source energy balance model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 316(108853), 108853. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108853>
- CONAGUA [Comisión Nacional del Agua] (2010). Título de Concesión – Número: 13DFE100778/26EMDA10.
- Coordinadora por un Atoyac con Vida (2017). Propuesta Comunitaria para el Saneamiento Integral de la Cuenca Atoyac-Zahuapan y la Reparación del Daño a las Comunidades. *Programa de Procesos Organizativos Comunitarios Socio Ambientales*. México. Disponible en: <https://www.centrofrayjuliangarces.org.mx/wp-content/uploads/2019/11/Propuesta-comunitaria-27-10-17.pdf>
- CoUS (s.f). Campus sustentable: acciones desde la CoUS. Disponible en: <https://cous.sdi.unam.mx/campus-sustentables/areas-verdes/acciones-desde-la-cous>
- CoUS [Coordinación Universitaria para la Sustentabilidad] y SDI [Secretaría de Desarrollo Institucional] (2022). Plan Integral para la Sustentabilidad desde la Universidad Nacional Autónoma de México. 47 pp.
- Cruz-Ayala, M. B., y Megdal, S. B. (2020). An overview of managed Aquifer Recharge in Mexico and its legal framework. *Water*, 12(2), 474. <https://doi.org/10.3390/w12020474>
- De la Luz, G. (2023). Recomendación de CNDH podría ser retirada al superar cumplimiento en Tlaxcala, considera la CEAS. *La Jornada del Campo*, no. 186. Disponible en: <https://www.jornada.com.mx/2023/03/18/delcampo/articulos/recomendacion-cndh-tlaxcala.html>
- DGCS (2016). El Geopedregal: modelo de rescate de pedregales remanentes en Ciudad Universitaria. *Boletín UNAM-DGCS-878*. Disponible en: [https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2016\\_878.html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2016_878.html)
- Driscoll, E. D., Palhegyi, G. E., Strecker, E. W., y Shelley, P. E. (1989). *Analysis of storm events characteristics for selected rainfall gauges throughout the United States*. Washington, DC: US Environmental Protection Agency.
- Elrick, D. E. and W. D. Reynolds (1992). Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. pp. 1-24. In: G. C. Topp, W. D. Reynolds, and R. E. Green (eds.). *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Frantzeskaki, N. (2019). Seven lessons for planning nature-based solutions in cities. *Environmental Science & Policy*, 93, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.033>

- Gaceta UNAM (2022). El Geo Pedregal alberga más de 2500 formas de vida. *Gaceta UNAM*, 5(345). Disponible en: <https://www.gaceta.unam.mx/el-geopedregal-alberga-mas-de-2-mil-500-formas-de-vida/>.
- Gaceta UNAM (2023). Matrícula estudiantil no deja de aumentar... *Gaceta UNAM*, 5(408). Disponible en: <https://www.gaceta.unam.mx/la-matricula-estudiantil-no-deja-de-aumentar/>
- Gaceta UNAM (2023b). Instala la UNAM humedales para tratamiento y reutilización de agua. *Gaceta UNAM*, 5(351). Disponible en: <https://www.gaceta.unam.mx/instala-la-unam-humedales-para-tratamiento-y-reutilizacion-del-agua/>
- García-Coll, I. (2023). Estudio de caso: proceso de construcción de la gestión integral del recurso hídrico y el manejo integrado de las cuencas que abastecen de agua a la ciudad de Xalapa, Veracruz. *CityAdapt, reconectando ciudades con la naturaleza - ONU*.
- Guilbaud, MN., Ortega-Larrocea, M., Cram, S. y van Wyk de Vries, B. (2021) Xitle Volcano Geoheritage, Mexico City: Raising Awareness of Natural Hazards and Environmental Sustainability in Active Volcanic Areas. *Geoheritage* 13(6) <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00525-9>
- Gobierno de México (2019). Usos del Agua. *Sistema Nacional de Información del Agua*. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>
- Gobierno de Puebla (2018). Acuerdo: Plan Rector para el Saneamiento del Río Atoyac. *Gobierno Constitucional del Estado de Puebla, Periódico Oficial*. Tomo DXVIII, número 3, cuarta sección. Disponible en: <https://ciudadesytransporte.mx/wp-content/uploads/2021/06/Plan-rector-para-el-saneamiento-del-del-Ri%CC%81o-Atoyac.pdf>
- Gobierno de Puebla (2020). Federación, Puebla y Tlaxcala, juntos para restaurar el Atoyac y su Entorno: Manrique. *Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial*. Disponible en: <https://smadsot.puebla.gob.mx/noticias/federacion-puebla-y-tlaxcala-juntos-para-restaurar-el-atoyac-y-su-entorno-manrique>
- Gómez Martín, E., Máñez Costa, M., y Schwerdtner Máñez, K. (2020). An operationalized classification of Nature Based Solutions for water-related hazards: From theory to practice. *Ecological Economics: The Journal of the International Society for Ecological Economics*, 167(106460), 106460. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106460>
- Gómez-Tagle, A., Gómez-Tagle, R., Batlle-Sales, J., Zepeda Castro, H., Guevara Santamaría, M., Maldonado L, S. y E. Pintor. (2008) Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. *Terra Latinoamericana*, 26(4), 287-297.
- González-Villarreal, F., Lartigue, C., Hidalgo, J., Hernández, B., y Espinosa, S. (2020). SWM technology for efficient water management in universities: the case of PUMAGUA, UNAM, Mexico City. *Water International*, 45(6), 526–551. <https://doi.org/10.1080/02508060.2020.1830588>

- Grey, D., y Sadoff, C. W. (2007). Sink or Swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, 9(6), 545–571. <https://doi.org/10.2166/wp.2007.021>
- GWP [Global Water Partnership] Technical Advisory Committee (2000). TEC Background Paper No. 4: Integrated Water Resources Management. *Stockholm*: Global Water Partnership.
- GWP Technical Advisory Committee (2014). TEC Background Paper No. 20: Water Security: putting the Concept into Practice. *Stockholm*: Global Water Partnership.
- GWP Technical Committee (2004). Catalyzing Change: A handbook for developing integrated water resources management (IWRM) and water efficiency strategies. *Elanders, Stockholm*: Global Water Partnership.
- Haase, D. (2009). Effects of urbanization on the water balance – A long-term trajectory. *Environmental Impact Assessment Review*, 29(4), 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.01.002>
- Heidt, V., y Neef, M. (2007). Benefits of urban green space for improving urban climate. En *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests* (pp. 84–96). Springer New York.
- Hernández, C. (2007). *Manejo de Residuos Sólidos en Ciudad Universitaria, México, D.F.* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional – TESIUNAM.
- Horne, A. C., O'Donnell, E. L., Loch, A. J., Adamson, D. C., Hart, B., y Freebairn, J. (2018). Environmental water efficiency: Maximizing benefits and minimizing costs of environmental water use and management. *WIREs. Water*, 5(4), e1285. <https://doi.org/10.1002/wat2.1285>
- Ibisch, R. B., Bogardi, J. J., y Borchardt, D. (2016). Integrated water resources management: Concept, research and implementation. En *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation* (pp. 3–32). Springer International Publishing.
- IG-UNAM (s.f.). El Geopedregal. Disponible en: <https://www.geologia.unam.mx/contenido/geopedregal>.
- INEGI (2020). Población Rural y Urbana. *Cuéntame de México*. Disponible en: [https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur\\_urb.aspx?tema=P#:~:text=En%201950%2C%20en%20M%C3%A9xico%2043,es%20de%2079%20por%20ciento](https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P#:~:text=En%201950%2C%20en%20M%C3%A9xico%2043,es%20de%2079%20por%20ciento)
- IPCC (2023). Summary for Policymakers. En: *Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Suiza, 36 p.
- Isla Urbana (2022). Nuestro Impacto. Disponible en: <https://islaurbana.org/nuestro-impacto/>
- Karthe, D., Heldt, S., Rost, G., Londong, J., Ilian, J., Heppeler, J., Stäudel, J., Khurelbaatar, G., Sullivan, C., van Afferden, M., Scharaw, B., Westerhoff, T., Dietze, S., Sigel, K., Hofmann, J., Watson, V., y Borchardt, D. (2016). Modular concept for municipal water management in the kharaa river basin, Mongolia. In *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation* (pp. 649–681). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-25071-7\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25071-7_25)

- Lesser, J. M., D. González y L. E. Lesser (1998) Balance de agua subterránea del acuífero de la Ciudad de México. *Revista Hidráulica Urbana, DGCOH, 4*.
- Li, C., Sun, G., Caldwell, P. V., Cohen, E., Fang, Y., Zhang, Y., et al. (2020). Impacts of urbanization on watershed water balances across the conterminous United States. *Water Resources Research*, 56, e2019WR026574. <https://doi.org/10.1029/2019WR026574>
- Li, E., Endter-Wada, J. y S., Li (2015) *Characterizing and Contextualizing the Water Challenges of Megacities*. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 51( 3): 589- 613.
- Lindstrom, T. y Middlecamp, C. (2017). Campus as a living laboratory for sustainability: The chemistry connection. *Journal of Chemical Education*, 94(8), 1036–1042. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00624>
- Marini Bulbarela, E.C. (2012) *Plan de seguridad del agua para el campus Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional – TESIUNAM.
- Marlow, D. R., Moglia, M., Cook, S., y Beale, D. J. (2013). Towards sustainable urban water management: a critical reassessment. *Water Research*, 47(20), 7150–7161. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.046>
- Márquez-Sánchez, H. (2016). *Estudio de la calidad y Tratamiento del agua de lluvia de recarga de los pozos de Absorción de Ciudad Universitaria*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional – TESIUNAM.
- Marsalek, J., Jimenez Cisneros, B., Karamouz, M., Malmquist, P.-A., Goldenfum, J. A., y Chocat, B. (2014). *Urban water cycle processes and interactions: Urban water series - UNESCO-IHP*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482288544>
- Mazrooei, A., Reitz, M., Wang, D., y Sankarasubramanian, A. (2021). Urbanization impacts on evapotranspiration across various spatio-temporal scales. *Earth's Future*, 9(8). <https://doi.org/10.1029/2021ef002045>
- McGrane, S. (2015): Impacts of urbanization on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review, *Hydrological Sciences Journal*, DOI: 10.1080/02626667.2015.1128084
- Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Menounou, P., Dimopoulos, P., Kolokotsa, D., Paravantis, J. A., Tsangrassoulis, A., Panaras, G., Giannakopoulos, E., y Papaefthimiou, S. (2023). Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180(113306), 113306. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113306>
- Moreno, I. (2019). CU: ejemplo de modernidad y desarrollo urbano. *Gaceta UNAM*, 5(038). Disponible en: <https://www.gaceta.unam.mx/index/wp-content/uploads/2019/03/210319.pdf>.
- Ngene, B. U., Nwafor, C. O., Bamigboye, G. O., Ogbiye, A. S., Ogundare, J. O., y Akpan, V. E. (2021). Assessment of water resources development and exploitation in Nigeria: A review of integrated water resources management approach. *Heliyon*, 7(1), e05955. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05955>



- O'Hogain, S., y McCarton, L. (2018). Nature-Based Solutions. In *A Technology Portfolio of Nature Based Solutions* (pp. 1–9, pp. 21–94 ). Springer International Publishing.
- ONU (2020). World Cities Day: Better city, better life. *United Nations Convention to Combat Desertification*. Disponible en: <https://www.unccd.int/news-stories/stories/world-cities-day-2020-better-city-better-life#:~:text=The%20world%27s%20cities%20occupy%20just,per%20cent%20of%20carbon%20emissions>.
- ONU (s.f.). Estrés hídrico y escasez de agua. *Decenio Internacional para la Acción 'El Agua Fuente de Vida' 2005-2015*. Disponible en: <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>
- ONU-Agua (2021). Summary Progress Update 2021: SDG 6 - Water and sanitation for all. Versión 2021, Suiza. Disponible en: [https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2021/12/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021\\_Version-July-2021\\_SP.pdf](https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2021/12/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021_Version-July-2021_SP.pdf)
- ONU-Agua (s.f.) Water Scarcity. Disponible en: <https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity>
- ONU-Habitat (2018). Índice de las Ciudades Prósperas, CPI, México 2018. Disponible en: <https://onuhabitat.org.mx/index.php/indice-de-las-ciudades-prosperas-cpi-mexico-2018>
- Oral, H. V., Carvalho, P., Gajewska, M., Ursino, N., Masi, F., van Hullebusch, E. D., Kazak, J. K., Exposito, A., Cipolletta, G., Andersen, T. R., Finger, D. C., Simperler, L., Regelsberger, M., Rous, V., Radinja, M., Buttiglieri, G., Krzeminski, P., Rizzo, A., Dehghanian, K., ... Zimmermann, M. (2020). A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: a critical assessment based on case studies and literature. *Blue-Green Systems*, 2(1), 112–136. <https://doi.org/10.2166/bgs.2020.932>
- Ortíz-Chao, C. G., y García Esparza, L. S. (2020). Configuración espacial, vitalidad urbana y riesgo de robo: el caso de la Ciudad Universitaria de la UNAM. *Academia XXII*, 11(21), 149. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252xp.2020.21.76678>
- Oyama, K., Pasquier, A., y Mojica, E. (2018). Transition to sustainability in macro- universities: The experience of the national autonomous university of Mexico (UNAM). *Sustainability*, 10(12), 4840. <https://doi.org/10.3390/su10124840>
- Pérez-Escobedo, H.M. (2013). Antecedentes REPSA. *Plan de manejo adaptativo de la REPSA CU, UNAM*. Secretaría Ejecutiva de la REPSA, UNAM. CDMX, México. Disponible en: <http://www.repsa.unam.mx/index.php/bases/bases-ant-pma/bases-ant-repsa>
- PUMAGUA [Programa de Manejo, Uso y Reúso del Agua en la UNAM] (2010:1). Informes de Avances 2010. Disponible en: [http://www.pumagua.unam.mx/pub\\_informes.html](http://www.pumagua.unam.mx/pub_informes.html). Recopilado el 12 de noviembre del 2022.
- PUMAGUA (2010:2). Anexo – Sistemas de Información Geográfica 2010. Disponible en: [http://www.pumagua.unam.mx/pub\\_informes.html](http://www.pumagua.unam.mx/pub_informes.html). Recopilado el 12 de noviembre del 2022.

- PUMAGUA (2017:1). Informes de Avances 2017. Disponible en: [http://www.pumagua.unam.mx/pub\\_informes.html](http://www.pumagua.unam.mx/pub_informes.html). Recopilado el 12 de noviembre del 2022.
- PUMAGUA (2017:2). Plano de riego con agua tratada. Disponible en: <https://web.siiia.unam.mx/ods-unam/archivosTHE/ODS6/Plano%20riego%20agua%20tratada.pdf>
- PUMAGUA (2019). Informes de Avances 2019. Disponible en: [http://www.pumagua.unam.mx/pub\\_informes.html](http://www.pumagua.unam.mx/pub_informes.html). Recopilado el 24 de noviembre del 2022.
- PUMAGUA (2020). Informes de Avances 2020. Disponible en: [http://www.pumagua.unam.mx/pub\\_informes.html](http://www.pumagua.unam.mx/pub_informes.html). Recopilado el 24 de noviembre del 2022.
- Rocha Guzmán, J.D. (2010) *Diagnóstico y sectorización del sistema de agua potable de Ciudad Universitaria de la UNAM. PUMAGUA* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional – TESIUNAM.
- Rodríguez, S (2018) Agua sí hay, pero está mal repartida. *Oxfam México*, disponible en: <https://www.oxfamMexico.org/historias/agua-s%C3%AD-hay-pero-est%C3%A1-mal-repartida>
- Rzedowski, J. 1954. Vegetación del Pedregal de San Ángel (D.F., México). *An. Esc. Nac. Cienc. Biol.* 8 59-129.
- Savenije, H. H. G., y Van der Zaag, P. (2008). Integrated water resources management: Concepts and issues. *Physics and Chemistry of the Earth (2002)*, 33(5), 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.003>
- SEREPSA (2008). Manual de Procedimientos. Programa de Adopción de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Secretaría Ejecutiva REPSA, Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, 108 pp.
- SEREPSA [Secretaría de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel] (2016). La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de Riesgos. 53 pp.
- Sharma, R., y Malaviya, P. (2021). Management of stormwater pollution using green infrastructure: The role of rain gardens. *WIREs. Water*, 8(2). <https://doi.org/10.1002/wat2.1507>
- Sosa, S. (2023). Tilda organización al Gobierno Local de superficial, impreciso y desordenado. *El Gen de la Información en Tlaxcala*. Disponible en: <https://gentetlx.com.mx/2023/04/12/tilda-organizacion-al-gobierno-local-de-superficial-impreciso-y-desordenado/>
- Swilling, M., Robinson, B., Marvin, S., Hodson, M. y Hajer, M. (2013). City-level decoupling: urban resource flows and the governance of infrastructure transitions. A report of the working group on cities of the international resource panel. United Nations Environment Program. 95 pp.
- Tapia, L. y Morales, J.A. (2013). Integración de un sistema de cuentas económicas e hídricas en la Cuenca del Valle de México. *Realidad, datos y espacio, Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 4(1).

- Tiburcio, A. (2013). *Desarrollo de un marco de indicadores para la gestión del agua urbana. El caso de la Ciudad de México* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México] Repositorio institucional – TESIUNAM.
- Tzanakakis, V. A., Paranychianakis, N. V., y Angelakis, A. N. (2020). Water supply and water scarcity. *Water*, 12(9), 2347. <https://doi.org/10.3390/w12092347>
- UNAM (2022) Planeación: Agenda Estadística UNAM, 2022. Disponible en: <https://www.planeacion.unam.mx/Agenda/2022/disco/#>. Recopilado el 27 de noviembre del 2022.
- UNESCO (2015). Abordar la escasez y la calidad del agua. Disponible en: <https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia/escasez-calidad>
- USDA (2008). Soil Quality Indicators. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Infiltration.pdf>
- Uttara, S., Bhuvandas, N., y Aggarwal, V. (2012). Impacts of Urbanization on Environment. *International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences*, 2(2). ISSN: 2249-3905
- Van Dijk, S., Lounsbury, A. W., Hoekstra, A. Y., y Wang, R. (2020). Strategic design and finance of rainwater harvesting to cost-effectively meet large-scale urban water infrastructure needs. *Water Research*, 184(116063), 116063. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116063>
- Velasco-Tapia, K. (2022). Caracterización y exportación de nutrientes en azoteas verdes extensivas durante eventos de precipitación-escurrimiento en la Ciudad de México. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional – TESIUNAM.
- Verhoef, L. y Bossert, M. (2019) *The University Campus as a Living Lab for Sustainability: A Practitioner's Guide and Handbook*. Delft University of Technology, Das Druckhaus Beineke Dickmanns GmbH.
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61–69. <https://doi.org/10.1021/es101403q>
- Wei, H., Wang, Y., y Wang, M. (2018). Characteristic and pattern of urban water cycle: theory. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 110, 349–354. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22342>
- Winograd, M., Van Eupen, M., Angon, S. y Garcia-Coll, I. (2021). Informa para Políticas Escalamiento de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) para la adaptación y la resiliencia en Xalapa: el caso de la cosecha de agua. *CityAdapt, reconectando ciudades con la naturaleza - ONU*.
- Zakaria, R.A.G., Hamid, A.R.A., Mansur, S.A., Resang, A., Zen, I.S. y Khalid, M.S. (2016) ‘UTM sustainable living laboratory campus, are the implementations effective?’, *Regional Conference in Engineering Education*, pp.1–6.
- Zárate (2023). El largo crepúsculo del Atoyac. *La Jornada del Campo*, no. 186. Disponible en: <https://www.jornada.com.mx/2023/03/18/delcampo/articulos/crepusculo-atoyac.html>

## Anexos

### I. Método WU2

Como mencionan Gómez-Tagle *et al.* (2008), este método utiliza datos de la fase estacionaria de la curva de infiltración acumulada (tiempo contra lámina acumulada), empleando los coeficientes del intercepto  $a = 0.9084$  y la pendiente  $b = 0.1682$  de la ecuación generalizada descrita por Wu *et al.* (1999). La ecuación adopta la forma de:

$$K_{fs} = \frac{A}{af}$$

Donde:

- $K_{fs}$  = conductividad hidráulica saturada en campo.
- A = pendiente de la recta obtenida por regresión de mínimos cuadrados (tt contra lec\_mm).
- a = intercepto 0.9084.
- El parámetro  $f$  es una variable definida por la ecuación:

$$f = \left\{ \frac{\left[ h + \left( \frac{1}{a^x} \right) \right]}{G^x} \right\} + 1$$

Donde:

- $h$  = carga hidráulica [mm]
- $G^x$  = factor de forma definido como:

$$G^x = d + \frac{r}{2}$$

Con  $d$  = inserción del anillo [mm] y  $r$  = radio del anillo [mm].

- $a^x$  = componente capilar [ $\text{mm}^{-1}$ ]. Este se obtiene de Elrick y Reynolds (1992, p. 10) y para las mediciones se tomaron los valores de  $0.036 \text{ mm}^{-1}$ , específicos para suelos con arenas gruesas y cascajos; también puede incluir algunos suelos altamente estructurados con grandes grietas y/o microporos.

## II. Entrevistas realizadas

*Inicio:* “las siguientes preguntas no pretenden de ningún modo evaluar el grado de conocimiento de los entrevistados, sino conocer su opinión sobre una temática de gran interés: el manejo (o gestión) del agua. Las respuestas pueden ser tan detalladas o breves como el entrevistado quiera, dependiendo de su tiempo y/o interés. Los entrevistados fueron elegidos por su grado de interacción con y conocimiento sobre el tema en cuestión.

Para comenzar, tómesese como etapas del *Ciclo Urbano del Agua en Ciudad Universitaria-UNAM* las siguientes: captación, conducción y almacenamiento, distribución y uso, recolección, tratamiento y descarga.”

### **Sección 1: gestión actual del agua en el campus.**

- 1) En su opinión cuál es la etapa más fuerte y la más débil del ciclo urbano del agua en CU, ¿qué podría hacerse para fortalecer la más débil?
- 2) ¿Qué tipo de limitaciones existen en el manejo del agua en el campus? ¿cuál es la principal?
- 3) ¿Y en el manejo de áreas verdes en el campus? ¿cuál es la principal?
- 4) Por otro lado, ¿qué fortalezas hay? ¿cuál es la principal?
- 5) ¿Quién considera que debe encargarse del manejo del agua en CU? ¿actualmente lo hace? ¿cumple satisfactoriamente con sus atribuciones?
- 6) En una escala del 1 al 10, 1 siendo el más bajo y 10 el más alto, ¿cómo calificaría el manejo actual del agua en Ciudad Universitaria?

### **Sección 2: incorporación de una gestión integrada del agua en el campus.**

- 7) La siguiente es una pregunta de sí o no: ¿cree que puede hablarse de un manejo “integrado” o “sostenible” del agua en el campus?
- 8) ¿Opina que la existencia de áreas verdes juega algún papel en el manejo del agua en el campus? Si sí, ¿puede desarrollar en qué sentido?
- 9) ¿Cree que sería importante que la comunidad universitaria se involucrara en el manejo del agua en el campus? Si sí, ¿tiene en mente algún modo? Si no, ¿por qué?

- 10) ¿Qué conocimientos o que disciplinas considera más importantes para el manejo del agua en el campus?
- 11) ¿Qué conocimientos o que disciplinas considera más importantes para el manejo de áreas verdes en el campus?
- 12) ¿Qué plan, programa o proyecto cree que es o ha sido más importante para el manejo del agua en el campus?
- 13) ¿Cree que se invierten suficientes recursos (humanos, energéticos, económicos) en el manejo del agua en el campus?
- 14) ¿Considera que puede hablarse de un balance hídrico cero en el campus? Es decir, que se extrae el mismo volumen de agua del que se infiltra en las áreas verdes (incluyendo REPSA) del campus.

### **Sección 3: percepción de riesgos y favorecimiento de la eficiencia hídrica.**

- 15) ¿Cuáles considera que son los mayores riesgos relacionados con el agua en Ciudad Universitaria?
- 16) ¿Cree que estos riesgos son únicos del campus?
- 17) ¿Cuáles cree que serían las tres acciones más efectivas para favorecer la eficiencia hídrica en el campus?

### **Sección 4: experiencia adquirida en la incorporación de medidas ambientalmente responsables.**

- 18) En la DGOC me platicaron sobre su propuesta acerca del “control ecológico del campus” y sobre cómo desde entonces todos los edificios y vialidades dirigen el agua de lluvia hacia zonas de infiltración. Administrativamente hablando, ¿cómo fue la gestión de tales modificaciones? ¿quedaron obras pendientes?
- 19) Durante su período como rector, ¿cuáles fueron los principales obstáculos para alcanzar un manejo más “sostenible” en el campus? Esto hablando tanto de áreas verdes como de agua.
- 20) Por último, con la experiencia adquirida y después de ver cómo han evolucionado las propuestas realizadas durante su período como rector, ¿qué cree que es indispensable en la búsqueda de la sostenibilidad en el campus?