

RESGUARDO AMBIENTAL EN MATERIA DE AGUA SUBTERRÁNEA URBANA EN TORNO A LA INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL ÁREA METROPOLITANA DE GUADALAJARA LÍNEA 3 DEL TREN ELÉCTRICO

**Environmental protection oriented to urban groundwater around the underground road infrastructure in the Guadalajara Metropolitan Area
Electric Train line 3**

JOSÉ JUAN PABLO ROJAS RAMÍREZ*

RESUMEN

El objetivo de este artículo es exponer el mecanismo de participación institucional en materia de resguardo ambiental orientado al agua subterránea durante la implementación de la obra de infraestructura subterránea en la línea tres del tren eléctrico de Guadalajara (Jalisco, México). Para tal efecto se recurre al estudio de caso, auxiliado del análisis hipotético-deductivo a partir del estudio de documentos técnicos y literatura especializada. Se explican las implicaciones y las correlaciones entre la transformación del espacio urbano y la introducción de infraestructura orientada al transporte en la modalidad de tren eléctrico, las afectaciones de estas y las acciones de prevención y mitigación de impactos. La principal limitación consiste en que solo se aborda la fase de inicio y aprobación de las obras. Este texto aporta un enfoque de análisis de los problemas de movilidad y transporte, implementación de la infraestructura subterránea e hidrogeología urbana. Las obras de infraestructura que no evidencien estudios concluyentes de no afectación o abatimiento de aguas pueden ser condicionadas o canceladas.

PALABRAS CLAVE: GEOHIDROLOGÍA, HIDROLOGÍA, TRANSPORTE, MOVILIDAD, IMPACTO AMBIENTAL.

* Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. Correo electrónico: jpablo.rojas@cutonal.udg.mx

ABSTRACT

The objective of this article is to present the institutional participation mechanism in the field of environmental protection aimed at groundwater during the implementation of the underground infrastructure work on line three of the Guadalajara electric train (Jalisco, Mexico). For this purpose, a case study is used, aided by the hypothetical deductive analysis based on the study of technical documents and specialized literature. The implications and correlations between the transformation of the urban space and the introduction of transport-oriented infrastructure in the electric train modality are explained, as well as the effects on these and the actions to prevent and mitigate impacts. The main limitation is that only the initiation and approval phase of the works is addressed. This text provides an analysis approach to mobility and transportation problems, implementation of underground infrastructure and urban hydrogeology.

KEYWORDS: GEOHYDROLOGY, HYDROLOGY, TRANSPORT, MOBILITY, ENVIRONMENTAL IMPACT.

Fecha de recepción: 24 de octubre de 2019.

Dictamen 1: 13 de junio de 2020.

Dictamen 2: 13 de julio de 2020.

DOI: <http://doi.org/10.21696/rcls102120201220>

INTRODUCCIÓN

Es innegable que el mundo del siglo XXI afronta una serie de problemas ambientales que tienen su génesis en las actividades humanas, afectan los ecosistemas globales y retornan con estragos catastróficos a la vida del humano en sociedad. Cualquier acción ejecutada con la finalidad de facilitar los procesos humanos conlleva una afectación directa o indirecta en el ambiente, aun en el espacio urbano, construido y facultado para desarrollar los procesos sociales. La transformación o la implementación de la infraestructura inciden en el ambiente, sea en suelo, aire o agua; de tal suerte que, al llevar a cabo dichas acciones, se tiene que tomar en cuenta cuáles medidas deben aplicarse para prevenir, mitigar, restaurar o compensar cualquier daño que se presente en el proceso.

Por tal circunstancia, los gobiernos locales y nacional, al poner en marcha proyectos de infraestructura, tratan en lo posible de requerir, diseñar y poner en funcionamiento acciones de resguardo ambiental, más cuando alguno de los recursos mengua en sus circunscripciones. En dicho caso —el que atañe al presente artículo—, el estado de Jalisco (México) ha tenido avances y retrocesos en materia de gestión ambiental durante las dos primeras décadas del siglo XXI, en específico en un tema de suma importancia como es el agua, con independencia de los grupos políticos que alternan en las instituciones de gobierno y pese a los impactos sociales y económicos.

La crisis hídrica derivada de la degradación ambiental, causada por la contaminación desmedida de los ríos, los suelos y la atmósfera, tiene como factor común la búsqueda del desarrollo urbano, económico y tecnológico acelerado, sin que haya tenido contrapesos de prevención, mitigación o restauración de los componentes naturales afectados por las acciones en torno a dicho desarrollo durante casi todo el siglo XX. Por lo que, entrado el presente siglo, la escasez y la baja calidad de los recursos obligaron a las instituciones a adoptar medidas en el asunto, con la aplicación de criterios normativos para garantizar que cualquier acción que conlleve algún impacto ambiental sea atendida en el proceso de ejecución, más aún en obras de infraestructura, como es el caso que se aborda en este artículo.

En lo referente al proyecto de infraestructura del transporte masivo para el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), la línea tres del Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) causó controversia desde la propuesta y el diseño hasta la ejecución y la actual evaluación de avances tanto en la esfera social como en la institucional. En esta última destaca la poca claridad sobre la atención de los

impactos reales, el gasto económico ejercido y las vulnerabilidades en los temas medioambiental y socioeconómico.

El Estudio de Impacto Ambiental (2011-2013), a cargo de la compañía contratista, elaborado para la construcción del sistema de transporte masivo en la modalidad de tren eléctrico presentó imprecisiones y poca claridad respecto a las acciones de remediación, en particular en la temática hídrica. Por tales razones, fue auditado mediante el oficio relativo a las “Condicionantes al estudio de impacto ambiental”, emitido por la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) el 14 de julio de 2014 (SEMADET, 2014). En dicho documento se estableció la obligatoriedad de los promoventes a observar medidas de resguardo ambiental y aclaración de sesgos de información mediante estudios particulares; se enmarcaron 19 puntos concernientes a suelo, aire, vegetación, agua y aspectos de control y supervisión de obras en desarrollo. De no haberse atendido la conclusión de la SEMADET, las obras y la restauración del espacio se habrían cancelado, con lo que hubiesen quedado en la situación anterior de obras de preparación. La determinación, por cuestiones de los costos ejercidos y la transformación del espacio, parecía lejana, ya que las obras se habrían suspendido en una fase avanzada de las excavaciones e instalación de pilotes. No obstante, en más de una ocasión este organismo obligó, mediante la convergencia con los ayuntamientos, a la suspensión momentánea de las obras.

Por consiguiente, y como parte del proceso condicionante para la construcción de la infraestructura destinada al transporte masivo de la línea tres del tren eléctrico, la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) ordenó la realización de dos estudios complementarios, científicos e interdisciplinarios para garantizar la seguridad hídrica, establecida en el punto 16, relativo a las posibles afectaciones a los cuerpos freáticos implicados en la intervención del espacio urbano en donde se proyectaron y realizaron los trabajos.

En el presente artículo se analiza el proceso institucional y las acciones realizadas para consolidar la puesta en marcha del proyecto de la línea tres del tren eléctrico y las posibles afectaciones ambientales en materia geohidrológica de tal proyecto. El objetivo es describir y examinar la participación de las instituciones del SITEUR y de la SEMADET en el espectro del gobierno local, con el fin de delimitar la competencia y la concurrencia de estas sobre las obras de infraestructura destinadas a la movilidad de la población del AMG para autorizar formalmente o, en su caso, requerir modificaciones de las obras si estas afectaban directa o indirectamente las fuentes subterráneas de abastecimiento hídrico de la ciudad: el acuífero de Atemajac.

Los estudios complementarios tenían la finalidad de que la institución a cargo del proyecto, el SITEUR, y las empresas involucradas en la obra de infraestructura (Viaducto 1, Viaducto 2, Senermex, contratistas y consultores) sugirieran y, a su vez, implementaran acciones preventivas, mitigadoras, restauradoras o compensatorias para reducir los riesgos y las afectaciones ambientales causados por las obras de acondicionamiento, construcción y operación de la infraestructura. Una de las principales observaciones se realizó en la condicionante número 16 en materia geohidrológica (SEMADET, 2014).

Lo anterior es acorde con prácticas que han devenido del esquema de gestión ambiental actual en el interior de las administraciones públicas, dada la penuria de recursos naturales y la vulnerabilidad global de estos —en especial del agua—, para estructurar bases tanto sugerivas en la atención de los problemas ambientales como metodológicas, normativas y pautas culturales a difundir con el propósito de conservar recursos naturales bajo el marco de la norma ISO Gestión Ambiental Estratégica (Grierson, 2007).

MÉTODOS Y MATERIALES

Para el desarrollo de la investigación se recurrió al estudio de caso, auxiliado del método hipotético-deductivo, a partir del análisis de los documentos técnicos institucionales dispuestos para la realización de las condicionantes. Se revisó la Manifestación de Impacto Ambiental, el Estudio de Impacto Ambiental, el Estudio de Mecánica de Suelos, el Manual de Operación de la Tuneladora EPB (Senermex, 2012) y el estudio particular que resolvió la condicionante 16 concerniente a la geohidrología y la hidrología urbanas. De estos, por cuestiones de confidencialidad institucional y por haber sido miembro del equipo de resolución de las condicionantes, solo se confronta la información requerida en el oficio de la SEMADET (2014), a fin de cumplir el objetivo dispuesto en el presente texto. Asimismo, se utilizó la información difundida en los medios de comunicación acerca de las acciones y posturas de los dirigentes de las instituciones involucradas, y se confrontó con la bibliografía especializada en hidrogeología urbana relacionada con obras de infraestructura subterránea. En esta última destacan los estudios de Custodio (2004), así como el de Dávila Porcel y De León Gómez (2011).

Además, se usó el análisis de la geografía urbana del área de estudio y la detección de hitos a partir de la georreferencia del trayecto de la línea del tren, la ubicación

de microcuencas y el territorio urbano. Finalmente se elaboró una lista de cotejo en la que se enuncian las medidas llevadas a cabo en otros casos expuestas en la literatura especializada.

¿Las acciones determinadas tanto por las instituciones como por los ejecutores del proyecto fueron pertinentes? es la pregunta planteada ante las condicionantes y los resultados de la concreción de la obra, con una demora de más de cuatro años, para el funcionamiento integral de la red, dado que las fases de diseño del proyecto, de preparación del espacio físico y de ejecución de las obras, y sus respectivas evaluaciones y retroalimentaciones de acciones y tiempos, se llevaron a cabo teniendo en cuenta aspectos de sustentabilidad, fundamentados técnica y científicamente en los estudios hechos por las compañías contratadas para realizar el Estudio de Impacto Ambiental, el diseño y la ejecución de las obras de ingeniería y de las consultoras especializadas en materia ambiental.

De tal suerte, la supervisión resultó ser una actividad en la que concurrieron instituciones y empresas. En este sentido, la cadena de ejecución, al menos en lo tocante al agua subterránea, estuvo supervisada, con lo cual se evitaron desviaciones del programa en las acciones de ejecución. Caso contrario se suscitó en la adquisición de implementos a cargo de contratistas, en la que, en ese momento, no resultaba imperante el control de las obras y de implementos, hasta que, en el cambio del periodo de los gobiernos estatal y municipales, se evidenciaron irregularidades en el control de la calidad de los insumos y en el detallado de las obras.

Para efectos del presente artículo, se omite el análisis de las irregularidades económicas y sociales tanto en la puesta en marcha de las obras como en la demora en la ejecución final, y se enfoca en las cuestiones ambientales, en específico en la hídrica, y en el sustento teórico de las medidas tomadas para asegurar la prevención o la mitigación de los estragos en el recurso hídrico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contexto del crecimiento poblacional, la movilidad en la Zona Metropolitana de Guadalajara y la necesidad de sistemas de transporte masivo con bajo impacto ambiental

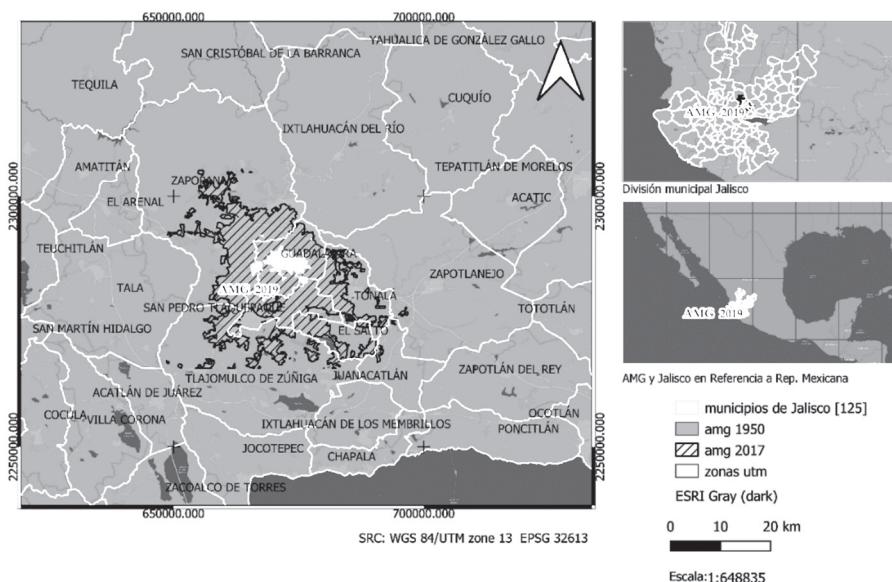
El AMG es la segunda área metropolitana más grande de México y la tercera en importancia económica. Además, contiene al segundo corredor industrial más grande del país, después del situado en Toluca, Estado de México, y es la segunda

en importancia en actividades culturales y terciarias (INEGI, 2016; Ramírez-Bautista, 2007).

Desde 2015, el AMG ha estado conformada por nueve municipios: Guadalajara, Zapopan, Tlaquepaque, Tonalá, Tlajomulco de Zúñiga, Juanacatlán, El Salto, Zapotlanejo y Acatlán de Juárez (en proceso de formalización, este último). La conformación inició con los primeros cuatro municipios mencionados, luego de los efectos radiales de la expansión urbana hacia territorios que no estaban del todo preparados para la recepción de actividades urbanas y que fueron acondicionados de manera acelerada, sin importar las afectaciones a suelos con vocación boscosa o agropecuaria (Montaño Salazar, Vieyra Medrano y Rodríguez Rodríguez, 2012).

MAPA 1.

Área Metropolitana de Guadalajara 1950-2019



Fuente: elaboración propia con datos del Sistema de Información y Gestión Metropolitana (s/f) y Gobierno de la República (2011).

De 1950 a 2000, la población de esta zona metropolitana se incrementó siete veces a causa de la conurbación de otras áreas de municipios aledaños a la ciudad y al crecimiento poblacional desmedido resultante de la dinámica reproductiva, por un lado, y de la dinámica migratoria de atracción a la ciudad, por el otro.

En 1960, en la ciudad de Guadalajara se contabilizaron 867 000 habitantes procedentes de localidades cercanas a la urbe. Su nuevo a vecindamiento tuvo la consigna de mejorar su calidad de vida laboral. En consecuencia, emergió una movilidad interna de la población inicial, cuyo resultado fue la creación de 73 nuevos asentamientos humanos que hicieron que la mancha urbana llegara a los municipios de Zapopan y Tlaquepaque. En ese entonces, los automóviles que circulaban eran alrededor de 36 000, y ya causaban problemas de tránsito vehicular en la ciudad (De Obeso Sanromán *et al.*, 2013; Montaño Salazar, Vieyra Medrano y Rodríguez Rodríguez, 2012).

Para la década de los setenta la ciudad ya tenía un fuerte problema de ordenamiento urbano, contaminación ambiental, un transporte público insuficiente y un parque vehicular con un crecimiento vertiginoso, por lo que el gobierno generó un documento llamado Plan General Urbano para el Área Metropolitana de Guadalajara que pretendía ordenar el crecimiento de la ciudad y apostarle al incremento del transporte público como solución al problema del congestionamiento vial (De Obeso Sanromán *et al.*, 2013).

El crecimiento poblacional en la zona conurbada de Guadalajara trajo consigo la problemática de la eficiencia de la movilidad urbana, junto con la dispersión de la población y la ruptura del control sobre los sistemas de abastecimiento de servicios públicos básicos, como es el caso del agua, debido a la sobreexplotación de esta en los diferentes usos y consumos.

A pesar de las diversas estrategias puestas en práctica por las autoridades de vialidad, como el enlace terrestre por sistemas mixtos de conexión, en los diferentes casos documentados se observa que la adición de más vehículos a un parque vehicular de por sí numeroso ocasiona problemas de traslado por la disminución de fluidez y las congestiones causadas por vehículos privados y de transporte público en horarios concurrentes, además de impactos importantes en el suelo y la atmósfera como es la desaparición de áreas verdes por la adecuación de más vías de acceso, la expansión del suelo sellado y la contaminación del aire (De Obeso Sanromán *et al.*, 2013; Chen y Chang, 2014; Al-Jarah *et al.*, 2019).

El transporte masivo por medio de un tren metropolitano se volvió la opción eficiente, en un primer momento, y sustentable, en un segundo momento de urgente sustentabilidad. A partir de la década de los 90 y dado el incremento poblacional, “la movilidad crece y se diversifica, los flujos son cada vez más numerosos y más dispersos en el espacio y en el tiempo (Miralles-Guasch y Cebollada, 2009, p. 199).

CUADRO 1. CRECIMIENTO POBLACIONAL, 1980-2019

Municipio	1980			1990			2000			2010			2015			2019		
	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres
Guadalajara	1 626 152	782 275	843 877	1 650 205	787 909	862 296	1 646 319	788 247	858 072	1 495 189	717 691	777 498	1 460 148	703 791	756 357	1 500 273	730 524	769 749
Zapopan	389 081	191 688	197 393	712 008	346 566	365 442	1 001 021	487 839	513 182	1 243 756	608 197	635 559	1 332 272	630 149	682 123	1 419 678	698 994	720 684
San Pedro Tlaquepaque	177 324	87 585	89 739	359 649	167 785	171 864	474 178	234 184	239 994	608 114	299 800	308 314	664 193	328 776	335 417	701 444	349 292	352 152
Tonalá	52 158	26 676	25 482	168 555	86 446	82 109	337 149	170 005	167 144	478 889	243 174	235 515	536 111	262 694	273 417	570 774	284 842	285 932
Tlajomulco de Zúñiga	50 697	25 327	25 370	68 428	33 880	34 548	123 619	61 346	62 273	416 626	207 063	209 563	549 442	269 776	279 666	626 468	310 667	315 801
El Salto	19 887	9 993	9 894	36 281	19 161	19 120	83 453	41 899	41 554	138 226	68 975	183 437	91 168	92 269	196 448	97 765	98 683	
Ixtlahuacán de los Membrillos	12 310	6 176	6 134	16 674	8 089	8 585	21 605	10 547	11 058	41 060	20 407	20 653	53 045	26 204	26 841	58 498	28 940	29 558
Juanacatlán	8 081	4 122	3 959	10 068	4 959	5 109	11 792	5 879	5 913	13 218	6 675	6 543	17 955	8 960	8 995	18 882	9 441	9 441
Zapotlán	Total AMG	2 335 690		3 003 868		3 699 136				4 434 878			4 867 137			5 166 221		

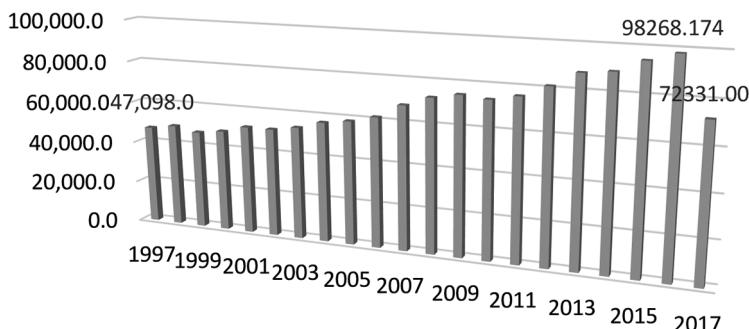
Fuente: elaboración propia con base en las Proyecciones de la población en México y entidades de 2016-2050 (INEGI CONAPO).

En el caso del AMG, cuyo crecimiento es de más de cinco veces (como se muestra en el cuadro 1), los recursos y la capacidad de movilidad resultan cruciales.

Pese a que en 2019 el tren eléctrico en Guadalajara no era esencialmente la ruta primaria y única del ciudadano, su utilización se había duplicado de 1997 a 2014, como se muestra en la gráfica 1. De tal modo, se deduce que es un medio de transporte útil y frecuente debido a la eficiencia de traslado en poco tiempo bajo los esquemas de vida del ciudadano en el AMG.

GRÁFICA 1. USUARIOS DEL SISTEMA DE TREN ELÉCTRICO DE LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA, 1997-2017

Total de pasajeros del tren eléctrico, L1 y L2 (miles)



Fuente: elaboración propia con base en los datos tabulados del tren eléctrico de la ciudad de Guadalajara actualizados a septiembre de 2017 (INEGI).

La extensión de la red con la línea tres permitiría una masificación del sistema, debido al incremento de la cobertura. En la actualidad, el fenómeno de intensificación del uso del automóvil particular responde, en parte, a la falta de cobertura eficiente y de calidad de los medios terrestres públicos que conecten a la población. La falta de cambio del patrón de uso hacia el tren responde a una limitación de la cobertura del sistema actual. “La movilidad cotidiana está muy vinculada a los fenómenos urbanos y metropolitanos, el mismo término de *commuting*, aquellos desplazamientos diarios y repetitivos entre el domicilio y el lugar de trabajo” (Miralles-Guasch y Cebollada, 2009, p. 195), por lo que los usuarios ingenian medidas en torno a los horarios y las rutas de conexión para lograr la eficiencia en la utilización del tren eléctrico metropolitano.

La línea subterránea se volvió la opción, al igual que en otras metrópolis latinoamericanas de gran tamaño como la Ciudad de México, Santiago de Chile, Lima, así como en europeas como París, Barcelona, Madrid, Berlín. Según De Obeso Sanromán *et al.* (2013), en “25 años la población de la Zona Metropolitana de Guadalajara se incrementó 221%”, lo que representa una movilidad de largas distancias, teniendo en cuenta que la dinámica de la población en la superficie tapatía es variable y múltiple.

Ante dicha situación, el crecimiento del AMG responde a los criterios de “ciudad difusa” (Precedo, 1996), es decir, un crecimiento expansivo o de metropolización ascendente tanto del municipio central como del área suburbana. A pesar de que la expansión urbana se percibe como un fenómeno evolutivo de las ciudades, en la realidad existe una brecha socioeconómica entre quienes pueden habilitar el espacio natural y aquellos que se asientan en territorios no adecuados para la urbanización (Dávila, 2009), donde padecen dos problemas primordiales: agua y conexión a la ciudad y sus servicios.

De Obeso Sanromán *et al.* (2013, p. 12) señalan que “los largos trayectos, la poca densidad y el crecimiento urbano constante complicaron la capacidad gubernamental de construir infraestructura para transporte público o no motorizado para garantizar el funcionamiento y la conectividad en todas las áreas de la ciudad”. Las grandes distancias entre las áreas habitacionales y los lugares de trabajo, comercios, espacios culturales y educativos, a causa de la dispersión sin planificación y a la ausencia de alternativas de transporte eficiente, así como el constante incremento del costo del transporte público, con un servicio malo y un trazado ineficaz de la red de cobertura, provocaron que los habitantes optaran por el vehículo privado para la movilidad cotidiana (Rentería y Ruiz Velazco, 2005). “Esto se conoce como un modelo autocéntrico de movilidad” (De Obeso Sanromán *et al.*, 2013, p. 12).

En la actualidad, dichas circunstancias devienen en una problemática que involucra la movilidad, el territorio y la sustentabilidad tanto en la planificación y la estructuración urbana como en las medidas a seguir para el diseño de planes, programas y proyectos de infraestructura orientada a la movilidad eficiente y sustentable, más aún cuando los medios de transporte eficientes como el metro o el tren ligero se postergaron demasiado en el AMG. A diferencia de la Ciudad de México, dicha postergación implicó que en la implementación de la línea tres se afrontaran problemas ambientales complejos. En consecuencia, las instancias ambientales estatales focalizaron sus esfuerzos en la supervisión del proyecto con el fin de garantizar la mitigación de impactos ambientales.

Las acciones institucionales en torno a la gestión ambiental en materia de agua subterránea respecto a la línea tres

El 14 de julio de 2014, a través de la Dirección de Protección Ambiental y la Dirección de Evaluación del Impacto Ambiental, se emitió la autorización de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial, una vez recibida y analizada la Manifestación de Impacto Ambiental Específica (MIA-E) y el resto de documentos que componen el expediente técnico para el desarrollo de las obras.

El desarrollo de la infraestructura comprendió la construcción de tres trazos de vías, 18 estaciones, talleres de mantenimiento y sitio de resguardo de trenes. Asimismo, contempló la interconexión con las dos líneas de tren anteriores, como se muestra en la imagen 1.

IMAGEN 1. LÍNEAS DEL TREN ELÉCTRICO EN GUADALAJARA



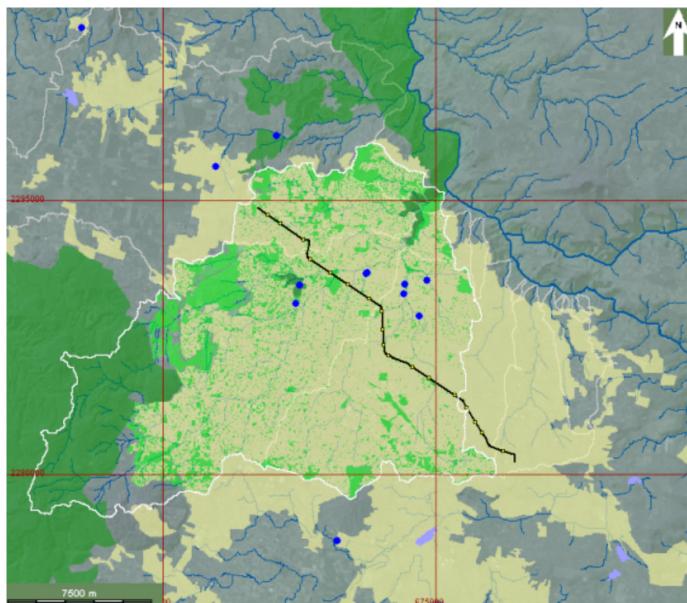
Fuente: UrbanRail.Net (s/f).

También se consideró que dicha obra estaría constituida por dos trazos elevados y uno subterráneo. Este último atraviesa el centro histórico de la ciudad. La idea de que gran parte de la infraestructura recorra el trayecto por vía subterránea se debe

a las consideraciones que se toman en cuenta para el desarrollo urbano y el ordenamiento territorial, que versan en la mínima afectación, una vez en operación, de zonas de la ciudad densas y con alta dinámica social y económica (SEMADET, 2014).

El área de la infraestructura de la línea tres se caracteriza tanto por el uso del suelo como el manejo ambiental. El primero comprende usos mixtos, entre los que destaca el asentamiento humano, compatible con infraestructura de uso industrial y condicionado a este. Respecto al aspecto ambiental, el área compromete las unidades de gestión ambiental (UGA) Ah4 137C e In 4 138 A, establecidas en el Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Jalisco emitido el 28 de julio de 2001 (SEMADET, 2014). En términos simples, estas UGA establecen lineamientos para el resguardo ecológico en materia de aire, suelo urbano y agua subterránea. En el mapa 2 se puede ver el empalme del área en donde se encuentran las microcuencas y el trazado de la línea tres. Se puede observar la delimitación urbana en torno a la línea tres. El lienzo muestra la red hidrográfica, enseguida, la mancha urbana, la delimitación de las microcuencas y, finalmente, el trazado de la línea.

MAPA 2. MICROCUENCAS IMPLICADAS EN EL PROYECTO DE LA LÍNEA 3
DEL TREN ELÉCTRICO METROPOLITANO, AMG



Fuente: Delgado Vázquez, Vázquez de León y Rojas Ramírez (2014),
y Condicionante 16: estudio de afectaciones geo-hidrológicas (SCT-SITEUR Jalisco).

EL POSIBLE RIESGO GEOHIDROLÓGICO EN EL PROYECTO DE LA LÍNEA TRES DEL TREN ELÉCTRICO METROPOLITANO

De acuerdo con Carrera y Vázquez Suñé (2008), uno de los principales impactos geohidrológicos de las obras modernas es el efecto dren, causado por la extracción de agua de los acuíferos en las distintas fases del proceso de preparación y construcción de las obras subterráneas. Dicha situación, hasta antes de la última década del siglo XX, no se había detectado en los proyectos de infraestructura debido a que las obras subterráneas no se llevaban a cabo en acuíferos, como se ha intensificado en el presente.

Según estos mismos autores (Carrera y Vázquez Suñé, 2008), el efecto dren consiste en la extracción del agua de los acuíferos con el fin de optimizar la obra civil. Tal extracción da lugar a descensos de los niveles freáticos. En el caso del acuífero de Atemajac, en Guadalajara, se advirtió de dicha situación con la finalidad de ejecutar medidas cautelares para remediarla a lo largo del proceso de construcción del tramo subterráneo. El efecto dren tendría lugar, no por el volumen inmediato, sino por el acumulado del agua extraída o perdida en las inmediaciones del trazo subterráneo.

El efecto dren en el acuífero de Atemajac se tomó en cuenta tanto en la información emitida en los estudios de impacto ambiental como en las respuestas a la condicionante en materia de agua (condicionante 16). Se analizó el caso y se socializaron los resultados sobre el proceso de excavación efectuado con la maquinaria del Sistema de Excavación de Túneles. Este usó una “tuneladora tipo TBM (Tunnel Boring Machine) EPB (Earth Pressure Ballance)” para la construcción subterránea y simultánea colocación y sellado de las dovelas que constituyen la infraestructura.

Como respuesta a lo anterior, las especificaciones de funcionamiento de dicho sistema están diseñadas para evitar una intervención directa en los cuerpos de agua subterránea, al mismo tiempo que se perfora y sella con bentonita (Senermex, 2012). De no haberse contemplado los efectos negativos, estos se habrían percibido de inmediato en el proceso de construcción, con riesgos ambientales posteriores, guardando las debidas proporciones con las acciones de mantenimiento de resellado de las dovelas estructuradas del túnel en el interior.

La interacción entre la obra de construcción y el impacto ambiental es bidireccional, ya que, si no se hubiesen realizado las acciones preventivas y mitigadoras para dicho efecto dren, las obras se habrían obstaculizado debido a la presencia de agua sobre el área de construcción, a la prolongación de tiempo en la fase de construcción y al encarecimiento de las obras, porque se habría tenido que pagar

servicios para dragado, remoción y disposición de agua (Cabrera y Vázquez, 2008).

En general, es posible que las obras subterráneas generen graves impactos sociales y ambientales sobre los acuíferos si no se adoptan las medidas adecuadas y de especificación tanto de los implementos como de los proveedores de los servicios de construcción, ya que es probable que se produzcan descensos que provoquen el secado de pozos, la intrusión marina, daños a ríos, humedales, manantiales o freatofitas, etcétera. También pueden producir ascensos del nivel (efecto barrera) que den lugar a inundación de edificaciones subterráneas (sótanos, metro o similares), encharcamientos, salinización por evaporación freática o contaminación por lavado piezométrico (Carrera y Vázquez, 2008).

En cuanto a la contaminación, autores como Custodio y Carrera (1989, 96-112) enfatizan que las obras públicas no necesariamente deben ser vistas como contaminantes; por el contrario, las obras subterráneas, en particular, son de las menos peligrosas desde el punto de vista de la contaminación. Si están por debajo del nivel freático, el flujo de agua se dirigirá hacia la obra, por lo que en cualquier vertimiento tenderá a quedar confinada. Más bien, el problema puede ser de tipo indirecto; el flujo de agua inducido por la obra puede movilizar contaminantes (Carrera y Vázquez Suñé, 2008, p. 29).

BREVE CONTEXTO DE LA GESTIÓN HÍDRICA DEL AMG EN LOS ÚLTIMOS DIEZ AÑOS: DISPONIBILIDAD, USO Y CONSUMO

La metrópoli está abastecida por fuentes superficiales y subterráneas: sistemas de pozos Tesistán y Toluquilla, sistema del río Santiago, acueducto Chapala-Guadalajara, presa Elías González Chávez (SIAPA, 2016).

A pesar de que más de 50 por ciento del agua utilizada en el AMG proviene del sistema de acueductos Chapala-Guadalajara, las obras de captación, conducción, potabilización y distribución del agua procedente del lago de Chapala han sido la principal fuente de agua de Guadalajara desde 1956 (Torres-Rodríguez, 2013).

En 2016 se emitió una declaración sobre el estrés hídrico adicional del AMG: “en los últimos 20 años el incremento de volúmenes ha sido de 7.6% frente al incremento de usuarios de 37.3%” (SIAPA, 2016). Esto implica que el consumo supera la dotación en el caso de Guadalajara. En el año 2018, la dotación para la metrópoli fue de 209.88 l/h/d, frente al consumo de 140.44 l/h/d, con una diferencia visible, traducida en pérdidas por la obsolescencia de la red subterránea (Pigoo, 2020).

Según fuentes oficiales, datos censales de 2010 y discursos institucionales de la Comisión Estatal del Agua (CEA) de 2009 a 2011, el consumo diario de agua de la población de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) era de 14.20 metros cúbicos por segundo (14 200 litros), para un poco más de tres y medio millones de habitantes, que equivale a un uso diario por persona de 346.21 litros, cantidad que comenzó a ser insuficiente, considerando que el dato fue calculado con base en la población del conteo realizado por el INEGI en 2005. Para 2010, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2010), la ZMG tenía 4 434 878 habitantes, y hacia 2019, el AMG contenía a 5 166 221 habitantes (INEGI, 2015), lo que ha elevado la necesidad de agua y la racionalización de esta; pero, no solo de recursos naturales, sino también de servicios públicos como movilidad, salud, educación, intensidad productiva y, esencialmente, un plan de ordenamiento territorial transversal.

La actualización de la dotación hídrica al año 2019 obedece a la información publicada por los directivos de la CEA: 5.5 metros cúbicos del sistema de ductos provenientes del sistema Chapala, 4.5 metros cúbicos por segundo de las fuentes subterráneas Atemajac, Toluquilla y Tesistán y de los manantiales Agua Azul, San Rafael, San Andrés, San Gaspar, entre otros sistemas hidráulicos que dotan menor cantidad, y 0.5 metros cúbicos por segundo del acueducto Calderón. Según el directivo de la Secretaría de Gestión Integral del Agua Jalisco, aún no se ha logrado satisfacer los requerimientos de la urbe al cien por ciento. Hay un déficit de tres metros cúbicos por segundo: solo se solventan 9.98 metros cúbicos por segundo de los 11 metros cúbicos por segundo necesarios (Gastón-González, 2019). Como es notorio, el déficit del recurso hídrico ha sido una constante hasta fechas recientes, con el cual se ha justificado la preocupación institucional por la posible alteración de la precaria condición de este recurso a causa de cualquier proyecto. En tanto, ante una dotación limitada para el consumo, la demanda de agua se incrementa a consecuencia de la disminución de la calidad de esta y el déficit en los repositorios subterráneos, como se puede apreciar en el cuadro 2.

Ante el panorama complejo del conurbado de Guadalajara, la racionalización de los recursos naturales y, como ya se mencionó, de servicios públicos como movilidad, salud, educación, intensidad productiva, entre otros, replantea el proceso de revisión y evaluación de las acciones públicas antes, durante y después de la implementación de obras públicas y el otorgamiento de permisos de urbanización a inversionistas privados, dados los supuestos y las comprobaciones de las afectaciones al medio ambiente por la transformación del espacio apropiado por los humanos.

CUADRO 2. DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ACUÍFEROS TRIBUTARIOS DEL AMG

Clave	Acuífero	R	DNC	VEAS					DMA	Estatus		
				VCAS	VEALA	VAPTYR	VAPRH	Positiva				
Cifras en millones de metros cúbicos anuales												
1401	Atemajac	147.3	25.7	133.09596	0	0.01288	0	0	-11.50884	Sin disponibilidad		
1402	Toluquilla	49.1	2.4	119.625284	0	0.170553	0	0	-73.095837	Sin disponibilidad		
1403	Cajititlán	47.5	0.5	63.613569	0	1.531029	0	0	-18.144598	Sin disponibilidad		
1428	Chapala	65.6	23.2	36.596595	0	0.618336	0	5.185069	0	Disponibilidad		
1450	San Isidro	64.2	19.6	44.498848	0	1.433	0	0	-1.331848	Sin disponibilidad		

Fuente: elaboración propia con datos de la Comisión Estatal del Agua Jalisco (2018) y de la Comisión Nacional del Agua (2018).

Requerimientos de estudios hidrogeológicos del Área Metropolitana de Guadalajara

La primera cuestión que emerge en el rubro hídrico en proyectos de infraestructura subterránea, en general, versa sobre el requerimiento de un estudio geohidrológico, acompañado del respectivo análisis de hidrogeología urbana. Ante esta cuestión, cabe destacar que la medida tomada por la SEMADET sobre los estudios geohidrológico e hidrogeológico urbanos, requeridos en las condicionantes emitidas por la institución, es un soporte que coadyuva a la anticipación de medidas preventivas y de mitigación o compensación por posibles afectaciones de acuíferos y mantos freáticos durante el proceso de implementación de las obras de infraestructura. Ello se debe a que dicho enfoque disciplinar contribuye, en primer lugar, al conocimiento de los flujos geohidrológicos y, en segundo lugar, permite saber cómo se genera la interacción entre la transformación urbana y dichos flujos.

En términos de Custodio (2004), es necesario conocer las variables vinculadas con el agua subterránea, el intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera y las repercusiones en la actividad urbana.

Se aplican principios de flujo del agua subterránea, recarga y transporte de masa. Los aspectos específicos que la hacen singular hacen referencia a la drástica modificación de la superficie del terreno con respecto a las condiciones naturales, la existencia de muy numerosos puntos en los que se producen fugas de agua al terreno, la introducción de contaminantes en relación con las actividades urbanas, y el importante efecto sobre el intercambio de gases del terreno con la atmósfera, lo que supone una restricción de la difusión de O₂ y un cambio de la presión parcial de CO₂ (Custodio, 2004, p. 284).

En otro orden de ideas, un análisis geohidrológico procede, en primera instancia, de la identificación y delimitación del ciclo geomorfológico en el punto específico donde se pretende llevar a cabo la actividad antrópica, ya sea la utilización de suelos para fines agropecuarios o la transformación a suelo urbano, y en donde la presencia de agua subterránea deviene como una variable a ser tratada, ya sea por la preeminencia del agua ante esquemas de escasez o por el uso potencial de esta en cualquier actividad. Es vital la importancia que supone el agua subterránea porque la contaminación de los repositorios subterráneos, por permeabilidad del suelo o por accidentes en la actividad humana, no reportada a las autoridades correspondientes acarrea impactos ambientales directos y colaterales, así como riesgos a la salud pública por la relevancia del recurso en el consumo (Carrera y Vázquez, 2008).

Hidrogeología urbana en el contexto de expansión urbana del AMG

La continua tecnificación e industrialización en las ciudades, a la par de la modificación del entorno urbano, ha provocado grandes transformaciones en el medio natural y social humano; las acciones llevadas a cabo acarrean impactos, en especial en componentes físicos como el agua, el aire, el suelo, la flora y la fauna. Dependiendo de la emergencia y de las coyunturas, algunos de los componentes sufren impactos ambientales con altos grados de severidad. El agua y el aire, por la emergencia de la contaminación, son los componentes del medio que se cuidan con cautela por el deterioro de la calidad de estos (Hibbs, 2016).

En muchas ciudades, el agua subterránea es la principal fuente de suministro para la población. A su vez, las actividades antropogénicas vierten grandes volúmenes de aguas residuales y efluentes industriales. El uso de una gran variedad de hidrocarburos y productos químicos en los procesos industriales ocasiona contaminación del suelo y de las fuentes de abastecimiento del agua potable (Carrera y Vázquez Suñé, 2008; Custodio y Llamas, 2003).

La complicada interacción entre los sistemas de flujo de agua subterránea y las ciudades (infraestructura, procesos, actividades y desechos) requiere de estudios cada vez más complejos, motivo por el cual emerge una nueva rama científica denominada “hidrogeología urbana” (HU), que es considerada una especialidad de las ciencias hidrogeológicas (Dávila Porcel y De León Gómez, 2011, p. 463).

Este campo disciplinar se orienta al estudio de las condiciones dinámicas del agua subterránea, la recarga, el uso y la calidad del agua; el manejo, repercusión

y preservación de los acuíferos en áreas urbanizadas y circundantes a estas, y las situaciones resultantes de proyectos urbanos. No se limita al estudio del sistema hídrico subterráneo para el abastecimiento, sino también establece criterios para abordar la interacción de la estructura urbana con las aguas subterráneas (Custodio y Llamas, 2003).

De acuerdo con Dávila Porcel y De León Gómez (2011), los estudios actuales de la hidrogeología urbana están motivados por la interacción del agua subterránea con el desarrollo socioeconómico de las ciudades, por lo que el abastecimiento, la vulnerabilidad, la afectación y el riesgo de dicha interacción son temas relevantes para las autoridades que vigilan el avance de obras de infraestructura para la posible explotación hídrica o construcción de obras encaminadas al avance del crecimiento y el desarrollo.

Para la viabilidad técnico-científica de la interacción resultante o la factibilidad de explotación se consideran las variables de espacio y tiempo, según estudios particulares sobre: a) el ciclo del agua subterránea en el lugar y las afectaciones en las áreas de amortiguamiento; b) la oscilación de la cantidad del agua subterránea en relación con las actividades humanas que requieren de esta; c) la contaminación producida por actividades antrópicas y d) la distribución de infraestructura subterránea conforme con los flujos del agua en el trayecto de tal infraestructura (Custodio y Llamas, 2003).

Si bien el conocimiento de las medidas de prevención, mitigación, remediación o compensación que se efectuaron en casos particulares ayuda a tener un referente de actuación pública en posibles eventualidades en las diferentes fases del proyecto (preparación, construcción, operación y abandono), las medidas que se deben aplicar en casos como el de la línea tres del tren eléctrico en el AMG deben responder a las especificidades del contexto del suelo, a la geohidrología, a la traza urbana y a la sociedad afectada. Las medidas puestas en práctica en otros lugares no pueden ser replicadas cabalmente debido a las diferentes capacidades económicas, de atención institucional y cultural. Además de la especificidad del entorno físico, es necesario considerar aspectos de contaminación puntual de acuerdo con el inventario ambiental (Echaniz, 1995).

Como afirman Lesser Illades *et al.* (2013), en la geohidrología, los principales impactos ambientales por la transformación del espacio a causa de obras de infraestructura son, en primer lugar y el más importante, el abatimiento del agua prístina, que no se usará para abastecer a la población y, en segundo, la contaminación antrópica en las diferentes fases del proyecto: desde la mezcla de aguas residuales

por ruptura de tuberías o filtración hasta la absorción de metales por el desgaste de rieles e hidrocarburos no necesariamente utilizados en los trenes eléctricos, sino en otros procesos asociados a la actividad de movilidad, que logran llegar por accesos o grietas de las paredes subterráneas o franjas asfálticas.

Desde una perspectiva de impacto ambiental, el estudio técnico de la afectación de los cuerpos subterráneos de agua se inserta en el proceso de evaluación del impacto ambiental. Se bosquejan los procedimientos técnicos que dicha obra conllevará y la organización adecuada de la implementación de la infraestructura, sin reducir las medidas preventivas y correctivas (Español-Echaniz, 1995).

La identificación y la valoración de los impactos en el estudio determinan la justificación de las medidas de solución elegidas, por lo que el hallazgo en materia geohidrológica en obras de infraestructura subterránea urbana condiciona la realización o no de dichas obras. De acuerdo con Foster (2020, p. 3), el uso del agua subterránea no está restringido a ciudades con fácil acceso a acuíferos de alto rendimiento, sino también ocurre ampliamente cuando el suministro público de agua se importa de fuentes distantes de agua superficial de baja confiabilidad y alto costo. En un primer momento, la complementariedad entre agua superficial y subterránea en un sistema de gestión integral resulta idónea, más aún en los casos metropolitanos, debido a la demanda alta y simultánea diaria. No obstante, el transcurso del tiempo y la expansión del sistema urbano, sea planeada o desordenada, detonan una “sobredemanda incremental” de agua subterránea y superficial (Bricker *et al.*, 2017).

Geohidrología en la ZMG

Conforme al Estudio Complementario de Mecánica de Suelos (anexo I del informe geológico y campaña de campo derivado del estudio HIDRO-3), el área metropolitana se encuentra en la cuenca hidrológica de Atemajac (Senermex, 2012). Esta cuenca cubre una superficie de 649.97 kilómetros cuadrados y tiene una longitud máxima en sentido este a oeste de 47.5 kilómetros y de sur a norte de 24.5 kilómetros. En esta área se han delimitado 12 subcuencas hidrológicas identificadas como Atemajac, arroyo Hondo, arroyo Osorio, arroyo San Andrés, arroyo Seco, Coyula, El Bajío, Huentitán, Rancho Contento, Río Blanco, San Gaspar y San Juan de Dios.

Según estudios revisados, existen dos tipos de acuíferos en esta área: granular superior libre, constituido predominantemente por arenas pumíticas (espesor máximo de 300 metros). En la zona superficial se aloja una zona fracturada somera,

con un nivel freático de entre 2 y 45 metros de profundidad. La recarga se produce, principalmente, por infiltración del agua pluvial y, en menor medida, de manera lateral, por el agua procedente de manantiales y pérdidas de conducciones y galerías. Así, resulta necesaria la realización del balance hídrico y de capacidad de recarga para determinar el abatimiento o recarga del acuífero Atemajac.

Bajo el granular superior se dispone el acuífero rocoso volcánico fracturado, formado por basaltos y andesitas, de carácter semiconfinante (presencia de nivel arcilloso subyacente al granular superior). La recarga llega normalmente a la zona de saturación por flujo lateral.

En cuanto al marco hidrogeológico, se observa que el acuífero de Atemajac discurre con otro acuífero circundante, el de Toluquilla, ubicado al sur de Atemajac.

La expansión urbana: los efectos en torno a la movilidad y al resguardo hídrico

La continua industrialización de las ciudades y la modificación del entorno urbano han provocado importantes transformaciones en la vida humana y en las relaciones sociales. Al existir un mayor equipamiento tecnológico que beneficia el desempeño de la vida cotidiana, se produce la percepción social de una mayor oferta laboral y diversificación productiva (Karakayaci, 2016; Uttara, Bhuvandas y Aggarwal, 2012).

Cada acción efectuada en un espacio terrestre, en especial en aquel que ha sido acondicionado para funcionar como sistema urbano, tiene impactos que no necesariamente son beneficiosos para el conjunto natural y humano, en especial en componentes físicos como el agua, el aire, el suelo, la flora y la fauna. Algunos de ellos sufren impactos ambientales con altos grados de severidad (Grierson, 2007). Pese a que Custodio (2004) argumenta que la ejecución de infraestructura subterránea implica una oportunidad para el estudio del agua subterránea, debe implicar acciones preventivas, mitigadoras y restauradoras.

La dependencia de las aguas subterráneas para el suministro público y privado del recurso hídrico es un fenómeno observado en las ciudades en desarrollo, que se produce en respuesta al crecimiento poblacional, la aceleración de la urbanización, las temperaturas ambientales fluctuantes más altas, el aumento del uso per cápita y la reducción de seguridad de las tomas de los ríos a causa del aumento de la contaminación (Foster, 2020).

CONCLUSIONES

Ante el esquema de escasez del agua para recarga de los acuíferos, limitada por el sellado urbano y las pocas áreas verdes —lo cual es información de dominio público—, las obras de preparación y construcción del proyecto de la línea tres del Sistema de Tren Eléctrico Urbano trajeron consigo el cuestionamiento social. A dicha situación se sumaron los puntos condicionantes que la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial emitió junto con la aprobación en materia ambiental.

En la especificidad del Área Metropolitana de Guadalajara, la implementación de obras de infraestructura de transporte eficiente y sustentable, como la de los sistemas del tren eléctrico, está destinada a atender un problema grave de movilidad en una metrópoli dispersa territorialmente. Tal implementación en un territorio transformado en urbano, sellado, con pocas posibilidades de infiltración, y en cuyo subsuelo se encuentra una de las principales fuentes de abasto hídrico, otorga una complejidad muy peculiar. Si bien no es la primera vez que dicha situación se ha producido, en el caso mexicano no se había presentado en lo que va del siglo XXI la instauración de un sistema de transporte subterráneo con una aparente afectación grave al sistema de suministro hídrico. Por consiguiente, el estudio interdisciplinar aportará herramientas metodológicas y rutas de acción de las instituciones implicadas en la ejecución de la obra.

En general, los impactos ambientales que acarrean los sistemas metropolitanos de trenes giran en torno a la vulneración de los mantos acuíferos, las afectaciones a suelos por reblandecimiento de estos y por la vibración, las emisiones de gases a la atmósfera, la pérdida fugitiva de hidrocarburos, grasas y aceites, la utilización de energía eléctrica, según organismos internacionales que recopilan información sobre las redes ferroviarias urbanas en el planeta. De tal suerte, resultan lógicas la intervención y la supervisión de instituciones ambientales con el fin de establecer sus concurrencias y competencias en la materia.

La realización de estudios particulares enfocados en el examen interdisciplinario acerca de la validación de las conclusiones expuestas en los estudios de impacto ambiental presentados inicialmente refuerza la certidumbre respecto a las posibles afectaciones ambientales sobre las que se tendría que actuar a corto, mediano y largo plazos.

Por lo tanto, es posible concluir que las obras de infraestructura que no exhiban estudios concluyentes de no afectación o abatimiento de aguas prístinas susceptibles a ser utilizadas ante el esquema de escasez pueden ser sometidas a un escrutinio

disciplinar más riguroso. Existe prioridad entre los servicios públicos, como lo muestra el caso de la línea tres del tren eléctrico en la metrópoli de Guadalajara, cuyas obras pudieron ser pospuestas, o apercibidas de cancelación, si la no afectación o la capacidad de restauración de los posibles daños al subsuelo, en términos hídricos, no eran comprobables por parte de los promotores.

BIBLIOGRAFÍA

- AL-JARAH, S.; Zhou, B., Abdullah, R. J.; Lu, Y., y Yu, W. (2019). Urbanization and Urban Sprawl Issues in City Structure: A Case of the Sulaymaniah Iraqi Kurdistan Region. *Sustanaibility*, 11(485). DOI <http://doi.org/10.3390/su11020485>
- BOLUND, P., y Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics* (29), 293-301. Recuperado de http://www.fao.org/uploads/media/Ecosystem_services_in_urban_areas.pdf
- BRICKER, S. H.; Banks, V. J.; Galik, G.; Tapete D., y Jones, R. (2017). Accounting for groundwater in future city visions. *Land Use Policy*, 69(December), 618-630. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.09.018
- CARRERA, J., y Vázquez Suñé, E. (2008). *Sobre la interacción entre acuíferos y obras subterráneas. El agua y las infraestructuras en el medio subterráneo*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Español.
- CHEN, M. C., y Chang, K. (2014). Reasoning the causality of city sprawl, traffic congestion, and green land disappearance in Taiwan using the CLD Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(11), 11464-11480. DOI: <http://doi.org/10.3390/ijerph11111464>
- Comisión Estatal del Agua Jalisco (2018). Acuíferos. Disponibilidad media anual de aguas subterráneas en acuíferos del estado de Jalisco de acuerdo con lo publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el día 4 de enero de 2018. Recuperado de <http://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/acuiferos/>
- Comisión Nacional del Agua (2018). Jalisco. Aguas subterráneas. Acuíferos. Recuperado de <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/jalisco/jalisco.html>
- CUSTODIO, E. (2004). Hidrogeología urbana: una nueva rama de la ciencia hidrogeológica. *Boletín Geológico y Minero* (115), 283-288. Recuperado de http://www.igme.es/boletin/2004/115_esp_2004/ARTICULO%201.pdf
- CUSTODIO, E., y Llamas, M. R. (eds.) (2003). *Intensive use of groundwater: challenges and opportunities*. Balkema.

- DÁVILA PORCEL, R. A., y De León Gómez, H. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), 463-477. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v63n3/v63n3a8.pdf>
- DÁVILA, J. D. (2009). Tan cerca de la ciudad y tan lejos de las tuberías. La gobernabilidad en el agua y el saneamiento periurbanos. En A. Aguilar e I. Escamilla (eds.). *Periferia urbana, deterioro ambiental y sustentabilidad* (pp. 99-124). Porrúa.
- DE OBESO SANROMÁN, G.; Rubio Urrea, J. E., Preciado Robles, K.; Armendariz Vallarta, L. A.; Silva, M., y Fernández Lignian, U. (2013). *Costos económicos y ambientales de los autos en el área metropolitana de Guadalajara*. Latin American Capital, Colectivo Ecologista Jalisco, A. C. Recuperado de <https://cronicadesociales.files.wordpress.com/2013/10/reporte-autos-lac-cej.pdf>
- ESPAÑOL-ECHANIZ, I. (1995). *Impacto Ambiental en Catedra de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Dextra.
- FOSTER, S. (2020). Global Policy Overview of Groundwater in Urban Development. A Tale of 10 Cities! *Water*, 12(456). DOI: 10.3390/w12020456
- GARCÍA-ALVARADO, J. M.; Pérez-González, M. E., y García-Rodríguez, M. P. (2014). Revisión del concepto de sellado de suelos. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 34(1), 87-103. DOI: 10.5209/rev_aguc.2014.v34.n1.45193
- GASTÓN-GONZÁLEZ, J. (2019). Invertirán 2,162 millones de pesos en 2019 en proyectos de infraestructura para dotación de agua. Diálogo con industriales constructores de la *Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción*. Recuperado de <https://cmicjalisco.org/component/k2/261-invertiran-2-162-millones-de-pesos-en-2019-en-proyectos-de-infraestructura-para-dotacion-de-agua>
- Gobierno de la República (2011). Índice de rezago social 2000-2010. Recuperado de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/indice-de-rezago-social2000-2010-nacional-municipal-localidad-y-ageb>
- GRIERSON, D. (2007). The urban environment: agendas and problems. *The International Journal of Environmental, Cultural, Economic & Social Sustainability*, 3(1). DOI:10.18848/1832-2077/CGP/v03i01/54314
- HIBSS, B.J. (2016). Groundwater in urban areas. *Journal of Contemporary Water Research & Education* (159),1-4.
- Latin American Housing Network (2013). Dinámica demográfica del área metropolitana de Guadalajara. Recuperado de https://www.lahn.utexas.org/Case%20Study%20Cities/Guadalajara/Metro%20Area_Introduction.pdf

- LESSER ILLADES, J. M.; Lesser Carrillo, L.; Garza, J. A.; López Pérez, M., y Gutiérrez Ramírez, J. D. (2013). Modelo matemático del acuífero Valle de Mexicali, B. C., para evaluar los efectos del revestimiento del CTA. En *Memorias del Congreso Nacional de la Asociación Geohidrológica Mexicana*. Sin pie de imprenta.
- MIRALLES-GUASCH, C., y Cebollada, A. (2009). Movilidad cotidiana y sostenibilidad: una interpretación desde la geografía humana. *BAGE, Boletín de la Asociación Española de Geografía* (50), 193-216. Recuperado de <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/1107/1030>
- MONTAÑO SALAZAR, R.; Vieyra Medrano, A., y Rodríguez Rodríguez, J. (2013). Transformación hacia una estructura urbana difusa por cambios en los sectores industrial y laboral en la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Intersticios Sociales* (5), 1-30. Recuperado de <http://www.intersticiossociales.com/index.php/is/article/view/60/pdf>
- PIGOO (Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores) (2020). Indicadores por estado. Recuperado de <http://www.pigoo.gob.mx/Estado>
- PRECEDO LEDO, A. (1996). *Ciudad y desarrollo urbano*. Síntesis.
- RAMÍREZ-BAUTISTA, B. (2007). Desarrollo urbano y desigualdad en el área metropolitana de Guadalajara. *Investigaciones Sociales*, 9(18), 313-344.
- RENTERÍA, V. J., y Ruiz Velazco, A. (2005). Morfología de la ciudad y movilidad intraurbana: Guadalajara al borde de la parálisis. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 9(194). Recuperado de <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-194-06.htm>
- SEMADET (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial) (2014). Oficio SEMADET DGPA/DEIA No. 577/4177/2014 de 14 de julio de 2014. Gobierno del Estado de Jalisco, Secretaría de Medio Ambiente y Territorio. Recuperado de https://semaDET.jalisco.gob.mx/sites/semaDET.jalisco.gob.mx/files/577_4177_2014_acuse.pdf
- SENERMEX (2012). Anexo 10.2. En *Informe ejecutivo de los estudios complementarios de mecánica de suelos. Informe geotécnico*. Sistema de Tren Eléctrico Urbano, Gobierno del Estado de Jalisco.
- SIAPA (Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado) (2016). *Abastecimiento de agua para Guadalajara: el río del tiempo*. Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado.
- Sistema de Información y Gestión Metropolitana (s/f). Mapa único de inundaciones. Recuperado de <https://sigmetro.imeplan.mx/mapa/mui>

- TORRES-RODRÍGUEZ, A. (2013). Infraestructura hidráulica en Guadalajara para el abastecimiento de agua potable: el caso de sustentabilidad en las galerías filtrantes de Guadalajara. *Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad*, 34(136), 317-357. Recuperado de <http://www.revistarelaciones.com/index.php/relaciones/article/view/170/199>
- Urbanrail.net (s/f). Guadalajara, tren urbano. Recuperado de <http://www.urbanrail.net/am/guad/guadalajara.htm>