

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA ECONÓMICAS, A.C.



**SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE AGUA**

UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA SATISFACER LOS  
REQUISITOS DE AGUA POTABLE EN COMUNIDADES DE  
ALTA MARGINACIÓN EN MÉXICO

**TESINA**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADO EN ECONOMÍA

PRESENTA

**GABRIEL ANTONIO GARCÍA PLATA**

DIRECTOR DE TESINA:

DR. ENRIQUE GARZA ESCALANTE

MÉXICO, D.F., DICIEMBRE, 2013

## Contenido

Introducción general .....	4
Primera Sección .....	7
Objetivo .....	7
Motivación.....	7
Revisión de literatura .....	9
Metodología.....	12
Estadística descriptiva .....	13
Principal acceso de agua.....	14
Tabla. Principal fuente de acceso al agua .....	14
Persistencia de diarrea .....	16
Tabla. Persistencia de diarrea (¿tuvo diarrea en las últimas cuatro semanas?).....	16
Percepción de mejora de calidad de vida en los últimos tres años .....	18
Tabla. Percepción de mejora de calidad de vida en los últimos tres años .....	18
Resultados .....	19
Efectos sobre la salud.....	19
Efectos sobre asignación de tiempo.....	22
Efecto sobre percepción de mejoras en calidad de vida .....	24
Conclusiones de la primera sección .....	26
Segunda Sección .....	28
Introducción.....	28
Motivación.....	28
Tabla. Fuente de agua principal por localidad .....	29
Importancia de la metodología de identificación de tecnologías de agua.....	32
Construcción de bases de datos .....	34
Base de datos de tecnologías.....	35
Supuestos asociados a restricciones de las tecnologías.....	36
Costo de las tecnologías .....	38
Supuesto de los sistemas de captación pluvial .....	40
Base de datos de localidades .....	41
Problema de optimización.....	47
Supuestos adicionales para implementar el modelo .....	49

Costos .....	51
Resultados .....	52
Limitaciones .....	52
Resultados generales.....	53
Sistemas de micro-filtración .....	53
Sistemas de captación pluvial .....	54
Conclusiones .....	54
Bibliografía.....	57
Anexos.....	61
Anexo 1: Resultados econométricos.....	61
Anexo 2: Resultados de tecnologías.....	64

## Introducción general

El objetivo de este trabajo es proponer una solución a uno de los problemas más importantes de México: la falta de acceso a un suministro adecuado y constante de agua potable en los hogares. De acuerdo al Censo de Población y Vivienda 2010 el 5% de los hogares del país actualmente acarrea agua de fuentes que pueden estar expuestas a contaminantes, como pozos, lagos o ríos, y aproximadamente el 10% reporta severos problemas en el suministro que recibe en el hogar, de manera que para compensar el suministro reducido, recurren al uso de alternativas que están expuestas a contaminantes. La Organización Mundial de la Salud clasifica tal condición de infraestructura como “básica” puesto que no hay alguna autoridad central que regule la calidad de dichas fuentes y certifique que el agua es adecuada para consumo humano. Además, los hogares que recurren al acarreo deben almacenar el agua en el hogar para futuro consumo lo cual los expone a contaminantes adicionales, tales como material fecal, bacterias o virus en el aire. Existe amplia evidencia de que los hogares que consumen agua expuesta a contaminantes tienen una mayor probabilidad de contraer enfermedades gastrointestinales. Por ejemplo, el estudio de Fewtrell *et al.* (2004) que utiliza datos de 60 estudios del impacto de mejoras en la infraestructura del agua de diferentes países indica que mejoras en la calidad de agua y mejoras en la infraestructura de agua reducen en 40% y 20% la incidencia de enfermedades gastrointestinales, respectivamente. Lo anterior tiene un efecto muy importante para el desarrollo, puesto que las enfermedades gastrointestinales representan una de las principales causas de mortalidad infantil y en adultos genera pérdidas en productividad e impactos al ingreso por días no trabajados. Otros estudios indican que

mejoras en infraestructura de agua en el hogar favorece la calidad de vida de las familias, puesto que tienen más agua para cubrir sus necesidades e invierten menos tiempo en el proceso de obtención de la misma, lo que repercute en asignación de tiempo a otras actividades más redituables o placenteras para el individuo.

Este trabajo se enfoca en ofrecer una alternativa de equipo de agua para aquellos hogares que actualmente no tienen agua entubada. Se plantea que existen alternativas de tecnologías más eficientes que el agua entubada que proveen a los hogares con agua de alta calidad y con un suministro más constante a un menor costo. Cada una de las tecnologías tiene diferentes requisitos de operación y funcionalidad de manera que se necesita información de clima, concentración demográfica, cercanía a fuentes de agua, tipo de terreno, entre otras variables, para determinar el tipo y tamaño de la tecnología que se debe implementar en cada localidad. La dificultad es que las localidades del país son heterogéneas en cuanto a concentración demográfica, condiciones de clima, geográficas y de terreno. Lo anterior complica que las compañías productoras de las tecnologías identifiquen adecuadamente cuál es el mercado potencial para su producto en México de manera que existe un problema de información tanto de los consumidores, que no saben que existen tecnologías alternativas, como de los productores para establecer un mercado en México de dichas tecnologías.

Este problema se resuelve en este trabajo a través de una metodología de identificación de tecnologías que permite seleccionar cuál de ellas es óptima para cada localidad del país, de manera que se pueda realizar recomendaciones sobre mercados potenciales a las compañías productoras o sobre alternativas óptimas de tecnologías para implementar en

localidades sin agua entubada a las autoridades operadoras de agua de los municipios. La metodología de identificación de tecnologías consiste en un modelo de optimización que selecciona de una base de tecnologías cuál es la óptima para cada localidad, donde se consideró la viabilidad de la implementación de la tecnología en la región y el costo. Para realizar dicho análisis se construyeron dos bases: una de tecnologías y una de condiciones en las localidades. Para construir la base de tecnologías se hizo una revisión extensa de las innovaciones que hay en el campo de tecnologías de agua y se seleccionó las más relevantes, donde se incluyó información de los requisitos operativos y los costos. Para construir la base de tecnologías se extrajo información geográfica, meteorológica, demográfica y económica de las localidades del país por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Este trabajo está dividido en dos secciones. En la primera sección se hará un análisis de impacto de una mejora a la infraestructura de agua sobre el bienestar familiar para el caso de México y se dará una indicación de por qué no necesariamente el agua entubada es lo óptimo para las comunidades. En la segunda sección se presentará la metodología de selección de tecnologías de agua y se mostrará los resultados de dicho proceso.

## Primera Sección

### Objetivo

El objetivo de esta sección es medir el impacto al bienestar de las familias de que en su comunidad haya una mejora tecnológica en cuanto al acceso al agua, lo cual será estimado mediante una metodología de efectos fijos. En este caso se tratará como mejora tecnológica pasar de acarrear agua a tener agua entubada dentro o fuera de la vivienda. A diferencia de la segunda sección donde se considerarán alternativas más baratas y eficientes al agua entubada, se eligió estimar el impacto del agua entubada pues es la tecnología más común y la que generalmente se considera cuando se mejora infraestructura de agua. En esta sección, sin embargo, se mostrará que si bien los hogares se benefician de obtener agua entubada antes que acarrear, no necesariamente es la tecnología óptima para implementación pues hay evidencia de que el agua entubada en México presenta mala calidad o suministro inconstante, por lo que los hogares utilizan fuentes alternativas de agua que requieren una mayor inversión de tiempo en su obtención y posiblemente estén expuestas a contaminantes. Los datos que se utilizarán serán de la ENNVIH 2002 y ENNVIH 2005. Se eligió utilizar la ENNVIH frente a otras encuestas por la riqueza de las preguntas y porque la encuesta es de corte transversal.

### Motivación

La problemática del agua en México se centra en dos temas: suministro inadecuado y mala calidad de agua. De acuerdo al Censo de Población y Vivienda 2010, aproximadamente 25 millones de mexicanos tienen un suministro inconstante de agua y alrededor de 5 millones consume agua que acarrea de fuentes vulnerables a contaminantes como pozos, ríos o

lagos. El problema de suministro inadecuado y mala calidad del agua es muy relevante para la población afectada pues tiene impactos directos e indirectos en su bienestar. Existe una creciente literatura de trabajos enfocados en medir el impacto que tiene la mala calidad del agua en la salud, primordialmente en lo que concierne a infecciones gastro-intestinales como una de las principales causas de la mortalidad infantil. Diversos trabajos entre los que destacan los de Shuval et al. (1981), Shanti-Gamper et al.(2008) y Kremer et al. (2011) indican que mejorar la infraestructura de acceso al agua de manera que se reduzcan el riesgo de contaminantes disminuye sustancialmente la incidencia de enfermedades gastro-intestinales lo que a su vez contribuye a la reducción de la mortalidad infantil. En particular en México la situación de la infraestructura del agua ha sido tan deficiente que hasta 1990 las enfermedades gastro-intestinales representaban la principal causa de mortalidad infantil<sup>1</sup>. Para solucionar dicha situación se estableció el programa Agua Limpia cuyo objetivo fue mejorar la calidad del agua disponible a través del aumento de conexiones a la red pública nacional. El programa Agua Limpia ha sido parcialmente exitoso pues a pesar de que aumentó la cantidad de viviendas conectadas a la red pública de agua no ha logrado un suministro constante en aquellas viviendas y todavía una proporción importante de la población utiliza fuentes alternativas de agua como pipas, llaves públicas y pozos, ríos o lagos como su principal fuente de consumo.

Otros trabajos, en particular los que se mencionarán en la sección de “Revisión de Literatura”, analizan otros aspectos de la mejora en el acceso al agua. En dichos trabajos no se considera una mejora en la calidad de agua a partir de mejor infraestructura, sino una

---

<sup>1</sup> Informe Final Programa de Agua Limpia. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/PAL2007.pdf>



valuación de mejoras en el servicio del agua sea a través de conexiones a la red de agua en el hogar o un aumento sustancial al suministro que se recibe en el hogar. En estos casos se estima el valor de la conveniencia de no tener que desplazarse para conseguir el agua, filtrarla, almacenarla y de tener un suministro mayor disponible. Los impactos indirectos de dicha mejora se reflejan en aumento a la felicidad, mejoras a la relación familiar, menores conflictos sociales, aumento en el tiempo destinado al ocio y la familia y aumento en el tiempo disponible para otras actividades como trabajo o educación.

### Revisión de literatura

Se realizó una revisión extensa de trabajos que tratan de medir el impacto de mejoras en el acceso o calidad del agua en diversas comunidades del mundo. La mayoría de los trabajos se enfocan en medir el impacto a la salud principalmente enfocado a la reducción de enfermedades gastro-intestinales. Dichos trabajos se orientan en analizar la efectividad de introducir mejoras a las fuentes de agua para reducir la incidencia de diarrea, donde se discute la efectividad de dicha medida. En particular resulta interesante el trabajo de Esrey et al. (1991) que toma en consideración 144 diferentes estudios del reducción de la diarrea, donde 33% son de intervención higiénica, 27% de mejoras al acceso del agua, 22% a mejoras sanitarias y 17% de mejoras a la calidad del agua. De los resultados concluye que la medida más eficiente para reducir la incidencia de diarrea es mejorar los servicios sanitarios y controlar el acceso al agua para consumo, mientras que la mejora en la calidad en agua y de infraestructura es poco significativo. Es importante destacar que en dicho estudio se consideran en muchas ocasiones como mejoras al acceso al agua fuentes públicas, las cuales todavía están expuestas a contaminación fecal. Un estudio más relevante para el caso de

México es el de Fewtrell y Colford( 2004) en el que se hace un meta-análisis de 60 estudios donde se encuentra que intervenciones higiénicas y mejoras a la calidad del agua reducen en promedio el riesgo de diarrea en 40% y mejoras a la provisión sanitaria y de infraestructura de agua reducen en promedio el riesgo de diarrea en 20%. En este estudio se encuentra un mayor impacto de intervenciones de calidad de agua e infraestructura pues se consideran primordialmente tecnologías de punto de uso, de las cuales la más reconocible son tuberías de agua de redes públicas en el hogar.

En esta sección no sólo se busca medir el impacto a bienestar por medio de mejoras a la salud sino también se intenta medir las mejoras a la felicidad. Se revisaron varios trabajos entre los que se debe destacar el de Devoto et al. (2011) porque utiliza una metodología para medir el efecto sobre la felicidad de conectar hogares a la red pública en la ciudad de Tánger en Marruecos como una medida de la disposición a pagar de la familia. En dicho trabajo se ofrece a los hogares la oportunidad de acceder a un crédito sin intereses por el costo total de la instalación de la red, la cual se trata como una dummy para medir el impacto de cambiar de obtener el agua de la fuente pública a tener acceso al agua en el hogar. El objeto es medir el efecto que tiene el aumento de tiempo en el ocio o producción, así como la reducción del estrés y la preocupación asociados a buscar agua. Se miden el efecto de que el hogar acepte la conexión en el hogar por medio de una metodología de mínimos cuadrados ordinarios, donde se busca controlar lo más posible por el perfil de la familia. Las variables dependientes varían según el rubro que se quiera medir donde se estima el impacto de mejoras al agua sobre las siguientes variables: aumento en consumo del agua, auto-reportes de mejoras a la salud mental, asignación de tiempo al ocio (

televisión, deporte, libros, etc), asignación del tiempo a educación, asignación de tiempo al trabajo, y auto-reportes de mejoras a la felicidad. Los resultados de este trabajo indican que la mejora en infraestructura de agua tiene efectos significativos en el bienestar y que las familias están dispuestas a pagar una parte sustancial de su ingreso, aproximadamente el 2% del gasto total familiar.

Otros trabajos similares que buscan medir cuánto es la disposición de pagar de una familia por servicios mejorados de agua son útiles para determinar el bienestar que genera la mejora tecnológica. De los trabajos revisados el más interesante es el de Pattanayak et al. (2005) en el que se mide la disposición a pagar de las familias en la ciudad de Katmandú en Nepal por tener un suministro constante de agua, donde las familias ya tiene conexión a la red de agua pero recibe agua de manera infrecuente. Utiliza una medida inicial que es el “valor de adaptación” que implica comprar agua de pipas o distribuidores privados, comprar garrafones, hervir el agua y almacenarla, como una medida mínima de disposición a pagar de las familias. Los autores mencionan, sin embargo, que el “valor de adaptación” es menor al valor real de lo que estaría dispuesto a pagar una familia por mejoras en su servicio de agua ya que no se consideran costos adicionales de tiempo invertido y de insatisfacción por la falta de agua, por lo que para encontrar el valor real se debe medir las mejoras al bienestar. Se encuentra que la disposición a pagar es sustancialmente mayor al “valor de adaptación” y que las familias, en promedio, presentan una fuerte preferencia por servicios mejorados de agua.

## Metodología

El enfoque de esta sección, como se mencionó en la motivación, es el de analizar los cambios al bienestar familiar de pasar de obtener su fuente principal de agua por medio del acarreo a pasar a tener agua entubada dentro o fuera de su vivienda. Se tratará de medir mejoras al bienestar de manera similar a la que se utilizó en Devoto et al( 2011) donde se estima el impacto sobre las siguientes variables: incidencia de diarrea, dolor de estómago y náusea en adultos en las últimas 4 semanas; percepciones de felicidad actual relativa a tres años y cómo perciben su vida a futuro; asignación de tiempo a lectura, a ayudar estudiar a los hijos, a la televisión, a la cocina, al acarreo del agua, al internet, a cuidar de adultos mayores, al acarreo de leña y asignación de tiempo a dormir.

La metodología a utilizar será de efectos fijos donde se buscará medir el impacto sobre las variables dependientes mencionadas anteriormente a partir de que en la vivienda se pase de depender principalmente del acarreo para su consumo en el 2002 a tener tubería dentro o fuera del hogar en 2005. Además se incluirán medidas adicionales para ofrecer mayor precisión en cuanto a mejoras en el acceso al agua a través de las siguientes variables: la primera considera si el hogar pasó de tener una fuente inadecuada de agua para beber en 2002 a una adecuada en 2005, la segunda si pasó de tener drenaje inadecuado en 2002 a tener drenaje adecuado en 2005, y la tercera si pasó de no consumir agua embotellada en 2002 a consumir agua embotellada en 2005. Para medir estos cambios se crearon cuatro variables dicotómicas: adecuada hogar, adecuada beber, drenaje adecuado y garrafón. En la sección *estadística descriptiva* se hará una pequeña discusión de la validez de la elección de las variables dicotómicas a partir de los datos que se observan,

donde se determina que “drenaje adecuado” es la mejor de ellas para observar los efectos de infraestructura mejorada.

Se eligió el modelo de efectos fijos con el objeto de incluir el efecto invariante en el tiempo a nivel individual de tener una mayor propensión a enfermarse, en el caso de las variables de salud, y de gustos, en el caso de las variables de asignación de tiempo.

La metodología a usar en el primer nivel será la siguiente:

$$Y = XB + A + e$$

Donde Y es la variable dependiente, X son las variables independientes entre las que se incluye las variables que capturan los cambios en infraestructura de agua, A captura los efectos específicos al individuo y e es el error.

Se incluirán controles de activos en el hogar para las variables de calidad de vida, de manera similar las que se incluyen en Devoto *et al* (2011), puesto que existen múltiples factores que podrían afectar dicha medida. Para las variables de asignación de tiempo y de salud no se incluirán controles puesto que las variables consideradas podrían afectar dichas variables dependientes son pocas y resultaban muy costosas puesto que se perdían muchas observaciones a causa del gran número de observaciones no disponibles presentes en la ENNVIH.

#### Estadística descriptiva

A continuación se dará una semblanza de las estadísticas más relevantes respecto a las condiciones de los hogares e individuos a analizar.

### Principal acceso de agua

Tabla. Principal fuente de acceso al agua

	Inadecuado( 2005)	Adecuado (2005)	Total 2002
Inadecuado (2002)	255 (50.70%)	248 (49.30%)	503 (inadecuado)
Adecuado (2002)	147 (2.8%)	5,112 ( 97.2%)	5,259 (adecuado )
Total (2005)	402 (inadecuado)	5,360 (adecuado)	

De la tabla anterior observamos que en 2002 gran parte de la población tiene acceso a agua entubada y que cerca del 10% tiene condiciones inadecuadas de agua, es decir, acarrea el agua de un pozo, río, lago o fuente pública. Para el 2005 el porcentaje de hogares con fuente agua inadecuada cae a 7.5% del total. La mitad de los hogares que estaban en una situación inadecuada en 2002 pasaron a una situación adecuada en 2005; es decir, del total de 503 hogares que tenían una situación inadecuada, se observan que 248 pasaron a tener agua entubada. El cambio tan importante en acceso al agua no es sorprendente pues a partir del 1998 por medio del programa Agua Limpia se inició una campaña para conectar a los hogares a la red pública de agua, el cual continuó activo entre 2002 y 2005.

Lo que resulta sorprendente es que 147 hogares pasaran de tener infraestructura adecuada a inadecuada como su principal fuente de agua en el hogar. Esto se puede deber a dos razones: que el suministro de agua proveniente de las tuberías es infrecuente o que el agua que reciben está contaminada o tiene coloración extraña y el hogar desconfía de ella para su consumo. Lo anterior implica que tener agua entubada no es una condición

suficiente para considerar que el hogar tiene una infraestructura adecuada respecto al agua. Esto va a influir directamente en los resultados pues si no se puede asegurar que la calidad del agua proveniente de las tuberías es adecuada, tener agua entubada en el hogar podría estar causando enfermedades gastrointestinales. En el caso de que el suministro de agua sea inconstante y de mala calidad, los hogares utilizarán fuentes alternativas de agua para complementar su suministro, las cuales pueden estar expuestas a contaminantes y requieran una inversión de tiempo para recolectar.

En términos prácticos para el propósito de la investigación, dicha situación genera limitaciones respecto a la precisión de las estimaciones pues ciertos hogares que están clasificados como “con infraestructura adecuada” al tener agua entubada podrían estar recibiendo agua contaminada o utilizar fuentes de agua alternativas para complementar su suministro, lo que implica una subestimación en el efecto sobre las variables de salud y de asignación de tiempo. Se puede controlar, hasta cierto punto, los efectos de una mejor calidad de agua sobre la salud a través de la variable de uso de garrafones; sin embargo, como tampoco podemos asegurar que la calidad de agua de los garrafones sea suficiente, puesto que pueden provenir de purificadoras de agua “piratas” o que no cumplen con requisitos mínimos de filtración, la medida de garrafón también se puede considerar en duda. Para determinar precisamente el beneficio de una mejora a la infraestructura del agua necesitaríamos poder controlar por la coloración, sabor y calidad del agua y por el número de horas que reciben de agua al día los hogares con agua entubada; sin embargo, dichas medidas requerirían un estudio especializado y no hay variables en la ENNVIH que puedan servir como proxy para medir dichos indicadores. Se espera por lo tanto que el

efecto de las variables “agua beber”, “agua hogar” y “garrafón” sobre las variables de salud, asignación de tiempo y felicidad estén subestimadas.

### *Persistencia de diarrea*

*Tabla. Persistencia de diarrea ( ¿tuvo diarrea en las últimas cuatro semanas?)*

Tipo	Número	Porcentaje	Año
Sí	3,398	8.58	2002
No	36,208	91.42	2002
Sí	2,190	5.35	2005
No	38,728	94.65	2005

Adicionalmente se presenta información descriptiva de la persistencia de diarrea, el cual es uno de los síntomas más comunes de enfermedades gastrointestinales. Mientras que es imposible determinar si la causa de la diarrea se debió a enfermedades gastrointestinales por mala calidad del agua a partir de los datos de la encuesta, la probabilidad de que este sea el caso es muy alta ya que el 88% de las enfermedades que causan diarrea se atribuyen a mala calidad del agua y drenaje inadecuado<sup>2</sup>. De la tabla se observa que en 2002 se reportó incidencia de diarrea en 8.58% de los individuos y en 2005 en 5.35% de los individuos. Se observa que entre el 2002 y el 2005 hay una caída en

<sup>2</sup> Organización Mundial de la Salud. “Water and Sanitation”.  
[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/factsfigures04/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/factsfigures04/en/)



incidencia de diarrea de más de 1200 individuos, lo cual representa aproximadamente 3.2% del total de los individuos. Dicha caída se puede explicar por una diversidad de factores incluyendo cambios en la alimentación, mejores servicios de salud, mejores condiciones de higiene en el hogar, mejor conservación de la comida, entre otros. Sin embargo, como se mencionó, el 88% de las enfermedades gastrointestinales que causan diarrea se atribuyen al consumo de agua contaminada a causa de malos servicios sanitarios y mala calidad de agua. La mejora en la infraestructura de agua en el hogar de pasar de fuentes inadecuadas a fuentes adecuadas se espera que represente un efecto importante sobre la incidencia de diarrea.

Entre las variables que se incluyeron en la metodología está “drenaje adecuado” que es una variable dicotómica que toma el valor de uno si el hogar pasó de tener instalaciones sanitarias inadecuadas en 2002 a tener instalaciones de descarga directa en 2005. Dicha variable podría servir para capturar el impacto de la mejora en infraestructura de agua en el hogar puesto que un importante número de los hogares que pasen a tener drenaje adecuado es porque en su hogar se realizó una instalación de agua entubada ya que los sistemas de descarga directa requieren un suministro constante lo que generalmente implica que el hogar tiene agua entubada. Además, como se mencionó en la introducción, los hogares cuya principal fuente de agua es por medio del acarreo tienen exposición a contaminantes en el agua de dos fuentes: contaminación del agua de la fuente de origen por mala calidad de agua y contaminación del agua cuando se almacena por material fecal a causa de malos servicios sanitarios en el hogar. Este indicador, por lo tanto, si bien no sirve para observar el efecto de mejoras en calidad de agua, sirve para controlar el efecto

de contaminación por materia fecal. La variable “drenaje adecuado”, sin embargo, no es variable perfecta para este estudio pues si el suministro de agua es inconstante, el hogar no puede hacer uso de la descarga directa y por lo tanto utiliza fuentes alternativas de drenaje que exponen el agua almacenada a material fecal. Además, esta variable no captura el impacto de que el agua que se recibe en el hogar sea de mala calidad. Por lo tanto, se espera que el efecto de esta variable sea más significativo que el de “agua hogar”, “agua beber” y “garrafón” pero que en si se subestime el efecto de una mejor infraestructura sobre la salud, asignación de tiempo y felicidad. Para poder hacer uso óptimo de esta variable se requeriría tener un estimado de horas al día de agua en los hogares con agua entubada.

*Percepción de mejora de calidad de vida en los últimos tres años*

Tabla. Percepción de mejora de calidad de vida en los últimos tres años

Tipo	Número	Porcentaje	Año
Mejóro	6,432	32.60	2002
Está igual	11,620	58.89	2002
Empeoró	1,681	8.51	2002
Mejóro	8,787	42.81	2005
Está igual	9,700	47.26	2005
Empeoró	1,938	9.93	2005

Finalmente se incluye una descripción de la percepción de mejora de calidad de vida de los individuos. Observamos que la mayoría de los individuos en ambos años considera

que su vida está igual que en los últimos tres años tanto en el 2002 como en el 2005 y que un importante número reporta que su vida mejoró. Entre el año 2002 y 2005 observamos una diferencia grande de individuos que reportan que su vida mejoró, donde en 2005 hay más de 2300 individuos más que reportan mejoras en su vida. El indicador de mejoras en calidad de vida es posiblemente el más complejo de explicar de la ENNVIH puesto que existen múltiples factores que podrían determinar una mejora en la vida de un individuo desde la composición familiar, el ingreso, los niveles de violencia, la presencia de fiestas en el pueblo, mayores niveles educativos, entre muchos otros. Es posible que entre estos factores, uno de los más importantes en determinar la mejora en calidad de vida en hogares que acarreaban agua es el pasar a tener una mejor infraestructura de agua puesto que implica una reducción sustancial en tiempo que invierten en desplazarse y que pueden utilizar para actividades recreativas, y el número de veces que se enferman lo cual repercute en su estado de ánimo, productividad, disposición e ingreso. Este indicador, sin embargo, en términos explicativos es el más débil de los mencionados anteriormente y no habrá manera certera de aislar la causalidad de percepción de mejoras en calidad de vida a causa de mejor infraestructura de agua.

## Resultados

### *Efectos sobre la salud*

Se observa que la variable “drenaje adecuado” y la constante, que captura el efecto individual, son las únicas variables significativas respecto a los efectos a la salud. La mejora en cuanto a instalaciones sanitarias tiene un efecto pequeño sobre la incidencia de diarrea,

dolor de estómago y náusea que son síntomas de enfermedades gastrointestinales. Se estimó con un intervalo de confianza del 99% que una mejora en drenaje reduce la probabilidad de enfermedades gastrointestinales pues se observa 2.9% menor incidencia de diarrea, 4.2% menor incidencia de dolor de estómago y 2.6% menor incidencia de náusea. Dicha información nos indica que la mejora en infraestructura reduce entre 2% y 5% la incidencia de enfermedades gastrointestinales. El efecto es mucho menor al reportado en otros estudios como el Fewtrell y Colford(2004) en que se encuentra que en promedio, con meta-datos de 60 estudios alrededor del mundo, una mejora en los servicios sanitarios reduce la incidencia de enfermedades gastrointestinales en un 20%. La diferencia se puede atribuir probablemente a un suministro inconstante de agua que obliga a los hogares a utilizar fuentes alternativas de drenaje, como fosas sépticas o dejar el material fecal en el terreno, lo que expone al agua almacenada en los hogares a contaminación fecal. Es decir, probablemente se está subestimando el efecto real de una mejora a los servicios sanitarios.

El efecto individual, que en este caso se interpreta como la propensión individual a enfermarse, tiene un efecto mayor donde una persona enfermiza tiene 9% mayor incidencia de diarrea, 19.3% mayor incidencia de dolor de estómago y 9.7% mayor incidencia de náusea.

Como se mencionó que no se observe un efecto significativo para las variables “adecuada hogar”, “adecuada beber” y “garrafón” se puede deber a que se tiene problemas de estimación pues tener agua entubada o garrafón no garantiza, debido a la mala calidad del servicio público del agua potable y a la presencia de distribuidoras de agua purificada “pirata”, buena calidad de agua o un suministro constante. Se esperaría que conforme al

estudio de Fewtrell y Colford(2004), una mejora en infraestructura de agua represente una reducción del 20% en la incidencia de enfermedades gastrointestinales.

El no encontrar efectos significativos, sin embargo, también ofrece información valiosa pues se presenta como un buen indicador de que en el país los servicios de agua entubada son deficientes. Para confirmar que este fuera el caso en la realidad se realizó una investigación adicional. Se encontró que efectivamente existen reclamos importantes en toda la república respecto a la presencia de filtradoras de agua "piratas", suministro infrecuente y mala calidad del agua. Por medio de una base del Instituto Nacional de Ecología y Medio Ambiente( INE) que capturó todas las quejas en periódicos respecto al agua entre 1996 y 2002 se encontró que las principales reclamaciones, en orden de importancia, fueron: poco suministro de agua, contaminación del manto acuífero, sobre-explotación del manto acuífero, mala calidad del agua, presencia de filtradoras "piratas", cobro irregular y toma ilegal de agua. Todos los estados de la república presentan por lo menos un reclamo de alguno de estos casos en el periodo, por lo que podemos asegurar que existe un mal suministro y mala calidad del agua generalizado a nivel país.

Es importante destacar que si bien la R cuadrada de estas regresiones es muy pequeña, en promedio .3%, el valor del estadístico F es significativo en un intervalo de confianza de 99%. Esto implica que a pesar de hay muchos otros factores que explican la varianza, las variables sí son relevantes para explicar las variables de salud.

### *Efectos sobre asignación de tiempo*

A diferencia de los efectos con las variables de salud, para las variables de asignación de tiempo si encontramos efectos significativos a partir de las variables “adecuada hogar”, “adecuada beber” y “garrafón”. Esta diferencia se puede deber a que las variables de asignación de tiempo sólo se ven afectadas por una mejora en la infraestructura de agua por la reducción del tiempo que se invertiría en acarrear el agua. En comparación con las variables de salud, que podíamos tener problemas de estimación por dos razones, mala calidad de agua y suministro inconstante, aquí sólo afecta el suministro inconstante el cual subestima el efecto sobre la asignación de tiempo en el hogar.

En este caso encontramos que mejorar la infraestructura de agua reduce el tiempo invertido en dos áreas principalmente: lavar ropa y acarrear agua. El efecto se ve por medio de la variable “drenaje adecuado” en que se ve una reducción promedio de 1 hora a la semana de tiempo para lavar y 2 horas a la semana de tiempo en acarrear agua, a nivel de confianza del 95%.

Las horas ganadas se ven principalmente en tiempo de lectura e internet. En el caso de tiempo de lectura los hogares que pasan a tener agua adecuada para beber aumentan en casi 2 horas a la semana su tiempo de lectura y los hogares que mejoran su infraestructura sanitaria ganan poco más de media hora a la semana, ambos con un intervalo de confianza de por lo menos 95%. En el caso de internet si el hogar tiene una mejora en servicios sanitarios aumenta más de 2 horas a la semana el tiempo destinado a internet, con un nivel de confianza del 99%.

Además tenemos dos efectos no esperados. Una mejora en la infraestructura sanitaria en el hogar reduce en media hora a la semana el tiempo destinado a la televisión, a un intervalo del 95% de confianza. Este efecto lo podemos descartar pues el valor de la F no es significativo, es decir, las variables de mejora en infraestructura de agua no hay evidencia de que las variables afecten significativamente al consumo de televisión. Otro efecto más curioso es que los hogares que pasan de no consumir a consumir garrafrones invierten casi tres horas más a la semana en acarrear agua, a un intervalo de confianza del 95%. Esta situación puede estar reflejando a aquellos hogares que acarrear agua para lavar su ropa y otras necesidades, pero que no la usan para beber pues la consideran muy sucia. Al no tener alternativa para beber, deben comprar garrafrones.

El valor de la constante para todos los casos con la excepción de tiempo dedicado a internet es significativo con un intervalo de confianza de 99%. La interpretación de la constante en este caso se puede considerar las preferencias o gustos individuales, los cuales son en general invariantes en el tiempo. Observamos que las preferencias individuales afectan en una magnitud mayor que las mejoras en infraestructura a la asignación de tiempo a las distintas actividades, donde el efecto más chico es un aumento de 4 horas a la semana en el caso de la lectura y el más grande de cuidar ancianos de casi 31 horas a la semana.

Al igual que con las variables de salud, la R cuadrada es muy pequeña donde la más alta es del 3.2% y la más baja de 0.1%. El valor del estadístico F, sin embargo, es significativo en un intervalo de confianza de 95% para todas las variables con excepción de tiempo asignado a deportes, televisión, cocina, cuidó anciano y ayudó a estudiar. Esto implica que la mejora

en infraestructura de agua es conjuntamente significativa para el tiempo asignado a leer, lavar ropa, internet, acarrear agua y dormir.

#### *Efecto sobre percepción de mejoras en calidad de vida*

Como se mencionó existe una serie de factores que podrían afectar si los individuos perciben que mejoró su vida, entre las cuales puede estar incluido mejoras a la infraestructura de agua. Además de las variables de mejoras en infraestructura de agua se incluyeron controles de activos del hogar a manera de proxy de ingreso. Como a las preguntas de ingreso en la ENNVIH hay muchas personas que no contestan y se asume que el ingreso explicaría en gran medida la percepción de mejoras en calidad de vida, se incluyeron dichos controles para intentar estimar el ingreso.

En este caso se encuentra que si el hogar pasó a tener servicios sanitarios adecuados, medido por la variable “drenaje adecuado”, el hogar tiene casi 10% más probabilidad de percibir que mejoró su vida, a un intervalo de confianza del 99%. Lo anterior puede explicarse por menor incidencia de enfermedades, percepción de mejores condiciones sanitarias o por una reducción en el tiempo invertido en actividades poco agradables, como cavar una fosa séptica o limpiar desechos. El efecto de una mejora en servicios sanitarios, sin embargo, es inverso cuando se les pregunta si creen que va a mejorar su condición de vida a futuro donde se tiene 13% menos probabilidad de percibir que va a mejorar su vida, aun intervalo de confianza de 99%. Lo anterior se puede deber a que al haber completado una parte tan importante de infraestructura quedé poco que mejorar en el hogar y por lo



tanto no perciba que se puede mejorar su condición de vida y espere que a futuro las cosas se mantengan igual.

Las constantes en este caso fueron muy significativas en ambos casos, donde el efecto individual, que puede interpretarse en esta ocasión como la personalidad, afecta de manera importante la variable. En el caso de si percibe que mejoró su vida, una persona con personalidad positiva tiene 55.4% más probabilidad de percibir que su vida mejoró y 53.4% que su vida va a mejorar en el futuro, ambas con un intervalo de confianza del 99%.

Se encontraron efectos no esperados en dos variables. Si el hogar pasa a tener bicicletas tienen 2.4% menos probabilidad de percibir que su vida mejoró, a un intervalo de confianza de 95%, y 2.3% menos probabilidad de percibir que su vida va a mejorar, a un intervalo de confianza de 90%. Además tenemos que si el hogar pasa a tener una fuente adecuada de agua para beber tiene 9.6% menos probabilidad de percibir que su vida va a mejorar, a un intervalo de 90% de confianza. No se me ocurre ninguna razón lógica por lo cual podría pasar este efecto.

Al igual que en los casos anteriores las R cuadradas son pequeñas de 2.6% para la regresión de “mejoró vida” y 3.2% para la regresión de “va a mejorar vida”. Los valores de los estadísticos F, sin embargo, son significativos al 95% de confianza. El conflicto con este estimador es que aunque se incluya solo a aquellos que tuvieron la transición de infraestructura de agua básica a infraestructura de agua mejorada y se incluyan controles de ingreso, todavía hay existen otros factores que podrían explicar el cambio en percepción de calidad de vida. Ya que no hay una manera a partir de los datos de la encuesta que

permita aislar la causalidad de mejoras en calidad de vida a causa de mejoras en infraestructura de agua, este indicador se debe considerar como débil en términos de su capacidad explicativa.

### Conclusiones de la primera sección

Esta primera sección intentó analizar el efecto sobre la salud, la asignación de tiempo y la percepción de calidad de vida a partir de mejoras en la infraestructura de agua en el hogar. Se mostró que existe evidencia limitada y hasta cierto punto discutible dada la calidad de los datos de mejoras a la salud, asignación de tiempo y percepción de calidad de vida a partir de mejoras en las instalaciones sanitarias en el hogar. Puesto que las instalaciones sanitarias son de descarga directa de agua, esto implica que el hogar también debe de tener agua entubada pues se requiere agua corriente para el funcionamiento de los sanitarios de descarga directa. Como se mencionó que no se encontrara efectos significativos en las variables “agua hogar”, “agua beber” y “garrafón” se puede deber a que el suministro de agua de la red pública es insuficiente, que el agua que se recibe es de baja calidad o por la presencia de filtradoras “piratas” que no cumplen con los estándares de calidad. Se presentó evidencia para justificar dicha situación, donde se observa que para todos los estados de la república se reporta por lo menos un caso de estas situaciones en el periodo entre 1996 y 2002. Lo anterior puede indicar que el supuesto inicial que se realizó con base en los datos de la OMS de que el agua entubada era una condición “adecuada” no aplica para México, pues no hay manera de garantizar que el agua cumple con la calidad esperada o que se tiene el suministro necesario. Estos resultados son relevantes para la segunda sección del trabajo, donde se busca implementar alternativas más eficientes, baratas y

efectivas para proveer de agua limpia a las comunidades sin agua entubada a través de otras tecnologías como por ejemplo con sistemas de micro-filtración o de captación pluvial. Puesto que no hay seguridad de que el agua entubada será de buena calidad o el suministro va a ser suficiente, se debe buscar alternativas que permitan a las personas tener una mejor calidad de vida, mayor tiempo disponible y una vida más saludable.

Que no se observen resultados significativos puede ser a causa también de que existan muchos *missing values* en la muestra y no se pudiera controlar por otros factores importantes que determinan la salud. Es posible también que de tenerse más años con los cuales realizar el estudio, en vez de tan sólo 2002 y 2005, tendríamos información más adecuada, más observaciones de cambio en infraestructura y nuestros resultados fueran más significativos. Otro posible problema de estimación es que existan factores no observables directamente en la muestra que afecten los resultados, como por ejemplo en el caso de mejoras a la felicidad un aumento en la violencia en las localidades que mejoraron su infraestructura, o dado que el programa Agua Limpia tenía poco tiempo de implementación, los resultados reflejen una curva de aprendizaje o infraestructura deficiente que estaba en proceso de mejora y que no necesariamente reflejen la realidad actual. Finalmente se podría discutir la validez de los resultados puesto que al considerarse un número pequeño de casos que cambiaron infraestructura (249), no sea creíble una generalización de los resultados. Lo anterior es una consideración importante, sin embargo, al no haber otra encuesta que cubra información de condiciones de agua y medidas de salud, asignación de tiempo y bienestar con representatividad nacional, este trabajo resulta valioso para ofrecer una primera aproximación al tema.

## Segunda Sección

### Introducción

En esta sección se presentará una metodología que permite determinar, en ausencia de agua entubada en los hogares, cuál tecnología se adaptaría mejor a las condiciones particulares de cada comunidad. La metodología parte de que para ciertas zonas, por ejemplo áreas rurales montañosas, el costo del agua entubada puede resultar más alto que las alternativas y no necesariamente asegura una mejor calidad y suministro constante, por lo que puede resultar óptimo introducir diferentes tecnologías como sistemas de captación de lluvia o sistemas de micro-filtración a las comunidades.

La metodología se construyó en tres etapas: primero, se generó una base de datos de tecnologías a partir de información recabada de diferentes compañías; segundo, se construyó una base de datos de las características sociodemográficas, geográficas, meteorológicas y económicas de las comunidades por medio del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG); tercero, se diseñó y programó un modelo de optimización cuyo objetivo es determinar cuáles tecnologías se adaptan a cada comunidad dadas sus características particulares y cuál combinación de ellas es la más barata, de manera que se pueda realizar sugerencias de política pública.

### Motivación

El interés de este trabajo, como se mencionó, es ofrecer alternativas a las comunidades donde no se tiene agua entubada. En México el problema de acceso a agua entubada se concentra principalmente en localidades de menos de 100,000 habitantes. Para representar la magnitud del problema actual se realizó la siguiente tabla con datos del Censo de

Población y Vivienda 2010. En la tabla se clasifica a las localidades por tres tamaños de población, según las clasifica INEGI, las cuales son: “menos de 2500 habitantes”, “2500 a 14999 habitantes” y “15000 a 99999 habitantes”.

Tabla. Fuente de agua principal por localidad

Tamaño de población	Menos de 2500 habitantes	2500 a 14999 habitantes	15000 a 99999 habitantes
Fuente principal de acceso al agua del hogar	Agua entubada en vivienda: <b>31.73%</b>	Agua entubada en vivienda: <b>57.06%</b>	Agua entubada en vivienda: <b>74.94%</b>
	Agua entubada en terreno: <b>45.19%</b>	Agua entubada en terreno: <b>34.85%</b>	Agua entubada en terreno: <b>19.70%</b>
	Llave pública: <b>0.81%</b>	Llave pública: <b>0.26%</b>	Llave pública: <b>0.21%</b>
	Agua entubada que acarrea de otra vivienda: <b>2.0%</b>	Agua entubada que acarrea de otra vivienda: <b>1.98%</b>	Agua entubada que acarrea de otra vivienda: <b>0.96%</b>

	Agua de pipa:  <b>3.13%</b>  Agua de pozo, lago o río:  <b>17.13%</b>	Agua de pipa:  <b>1.46%</b>  Agua de pozo, lago o río:  <b>4.38%</b>	Agua de pipa:  <b>1.15%</b>  Agua de pozo, lago o río:  <b>3.35%</b>
Dotación de agua de la red pública	Diaria: <b>68.27%</b>  Cada segundo día: <b>21.26%</b>  Dos veces por semana: <b>4.78%</b>  Una vez por semana: <b>3.75%</b>  De vez en cuando: <b>1.94%</b>	Diaria: <b>65.02%</b>  Cada segundo día: <b>19.01%</b>  Dos veces por semana: <b>7.14%</b>  Una vez por semana: <b>5.02%</b>  De vez en cuando: <b>3.82%</b>	Diaria: <b>68.02%</b>  Cada segundo día: <b>13.75%</b>  Dos veces por semana: <b>6.82%</b>  Una vez por semana: <b>7.81%</b>  De vez en cuando: <b>3.6%</b>
¿Tiene excusado, retrete, sanitario, letrina o hoyo	Sí: <b>87.04%</b>  No: <b>12.96%</b>	Sí: <b>92.79%</b>  No: <b>7.21%</b>	Sí: <b>97.48%</b>  No: <b>2.42%</b>

negro en la vivienda?			
Admisión de agua para servicios sanitarios	Tiene descarga directa de agua: <b>30.04%</b>  Le echa agua con cubeta: <b>39.63%</b>  No se le puede echar agua: <b>30.33%</b>	Tiene descarga directa de agua: <b>53.80%</b>  Le echa agua con cubeta: <b>35.28%</b>  No se le puede echar agua: <b>10.92%</b>	Tiene descarga directa de agua: <b>68.11%</b>  Le echa agua con cubeta: <b>29.30%</b>  No se le puede echar agua: <b>2.59%</b>

Se puede observar que las tres tipo de localidades reportan un importante porcentaje de fuentes de agua “de llave pública”, “de pipa” y “agua de pozo, río o lago” que la Organización Mundial de la Salud(OMS) califica como “básicas” pues están expuestas a contaminación y dejan vulnerables a la población. Lo anterior es especialmente grave si no hay sanitarios con descarga directa ya que dicha vivienda debe almacenar el agua en el hogar, lo que la expone a bacterias y parásitos provenientes de materia fecal.

De la tabla podemos observar que en las localidades de entre 15000 y 99999 habitantes aproximadamente el 6% de la viviendas consumen de fuentes de agua “básicas”, en

localidades de entre 2500 a 14999 habitantes aproximadamente el 8% consumen de fuentes de agua “ básicas” y en localidades con menos de 2500 habitantes aproximadamente el 23% consumen de fuentes de agua “básicas”. Adicionalmente podemos observar una amplia varianza en la dotación de agua en el hogar en estas localidades donde entre el 32% y 35% de las viviendas reciben un suministro inconstante en distintos grados. Cabe destacar que en las localidades de entre 14,999 y 99999 habitantes aproximadamente el 11.5% de la población tiene un suministro muy deficiente donde reportan como frecuencia del servicio ya sea “ una vez a la semana” o “de vez en cuando”.

#### Importancia de la metodología de identificación de tecnologías de agua

Este problema de suministro y calidad de agua se podría resolver con tecnologías alternativas al agua entubada. En teoría si existen alternativas más eficientes y baratas al agua entubada debería existir un mercado para ellas; sin embargo, existe un problema de información tanto de los consumidores que desconocen la existencia de dichas alternativas como de los productores que tienen problemas para identificar mercados viables para su producto, de manera que es complicado establecer un mercado para dichas tecnologías en México. Por un lado, la penetración en México de las tecnologías en la base de datos, todas de compañías grandes con amplia penetración en el mercado internacional, es prácticamente nula ya que no hay oficinas de distribución de los productos en México o en el caso de las que hay, como Siemens, se tiene que realizar un pedido especial dada la poca demanda. Por otro lado, las productoras nacionales de tecnologías alternativas de agua como las que se incluyen en la base de datos tienen una distribución muy escasa en México. Por ejemplo, en el caso de Isla Urbana, uno de los principales referente en distribución de



sistemas de captación pluvial en México, en sus más de 4 años de operación y a pesar de haber tenido amplia difusión mediática como ganador de Iniciativa México, tan solo han vendido 1151 sistemas de agua. Como se verá más adelante en la sección de resultados, tan sólo en región de Papaloapán en Oaxaca el potencial de distribución para ese producto es significativamente mayor a 1151 sistemas.

El problema de información que restringe que se construya un mercado de estas tecnologías en México se define en dos partes. Por un lado se tiene el problema del consumidor. El problema de agua de cada hogar es conocido por sus miembros. Ellos conocen cuál es el principal problema que sufren, cuánto esperan recibir de agua diariamente y cómo adecuarse de mejor manera a la mala calidad o falta de agua. Estos, sin embargo, tienen conocimiento limitado de todas las alternativas que existen en el mercado, sobre todo aquellas alternativas que sirven a nivel comunidad. Las alternativas de suministro a falta o mala calidad de agua que conocen generalmente se restringen a compra de garrafones, pipas o algún pozo o fuente pública. Las alternativas de infraestructura más complejas e innovadoras como sistemas de captación pluvial o sistemas de micro-filtración requieren un conocimiento más extenso del mercado de tecnologías del agua y de las condiciones requeridas para la implementación de dichas tecnologías. Esto implica que los habitantes de comunidades sin agua entubada difícilmente buscarán alternativas de suministro de agua a las fácilmente accesibles en su comunidad, como garrafones o pipas, puesto que desconocen de la existencia de diferentes tecnologías y, por lo tanto, se requiere de un agente especializado para realizar dichas recomendaciones.

Por otro lado se tiene el problema del productor. Los productores de las tecnologías alternativas conocen a fondo su producto. Saben cuáles son los requisitos de funcionamiento, cuál es el perfil de su consumidor promedio, cuál es la capacidad de su producto y quiénes son sus principales competidores. El problema es que al analizar el mercado mexicano lo que observan es un país con 95% de los hogares conectados con agua entubada y los que no, generalmente distribuidos en zonas rurales relativamente pobres. Además les es difícil distinguir si su tecnología sería adecuada para tales comunidades, puesto que desconocen las condiciones geográficas, meteorológicas, socio-demográficas y económicas de dichas localidades, y realizar un estudio para determinar la viabilidad de introducir su producto resulta costoso. Para la empresa el mercado mexicano es pequeño, disperso y no saben si hay una disposición a pagar por su producto. Bajo esta metodología se ofrece una herramienta valiosa para analizar a las comunidades del país, de manera que se ofrezca información al productor de dónde sería óptimo comercializar su tecnología y, como la metodología minimiza el costo de todas las opciones viables para la comunidad, asegurar que hay una demanda por el producto ya que sería la opción más barata para la comunidad.

#### Construcción de bases de datos

Para este trabajo se construyeron dos bases de datos: una de tecnologías y una de localidades. Para construir la base de tecnologías se realizó una investigación profunda sobre cuáles tecnologías existían, sus precios, su capacidad y su calidad de filtración. La base de localidades consideró información de diferentes fuentes que posteriormente fue geo-referenciada para extraer datos geográficos y meteorológicos a nivel localidad.

### *Base de datos de tecnologías*

Con la base de tecnologías se intentó capturar la mayor cantidad de tecnologías disponibles que fueran de alta calidad y que tuvieran suficiente capacidad para cubrir los requisitos de agua de cada hogar en comunidades con menos de 100,000 habitantes. Se utilizó como principal fuente de información, sobre las innovaciones en el campo de tecnologías de agua, los documentos de la organización Global Water Intelligence, una organización que se dedica a proveer inteligencia de mercado para el sector de filtración y reciclaje de agua. En esta fuente se encontraron los últimos avances en tecnologías de “punto de uso”, es decir, aquellas que permiten a los hogares adquirir agua directamente sin tener que acarrearla o almacenarla. El reporte se publica trimestralmente y se revisaron los archivos de 2008 a la fecha. Los avances en dichas tecnologías cubrían una amplia gama, desde sistemas de filtración de agua de mar hasta sistemas de captación de evaporación.

Originalmente el objetivo era incluir en la base de datos una serie de tecnologías que permitiera encontrar por lo menos una tecnología alternativa al agua entubada para cualquier localidad del país; sin embargo, sólo se pudo obtener información de precios para un número limitado de tecnologías lo que imposibilitó que se incluyeran todas. Además, algunas de las tecnologías más innovadoras seguían en desarrollo o tenían restricciones de venta. Para algunas comunidades, sobre todo aquellas en condiciones desérticas o distantes de alguna fuente de agua y con bajos niveles de precipitación, no se ofrecen otras opciones al agua entubada.

La base de datos está compuesta de 35 diferentes tecnologías que varían en cuanto a capacidad, tipo de operación y precio. Todas las tecnologías que se eligieron son de muy

alta calidad y utilizadas por organismos internacionales como la ONU, USAID y en situaciones de desastres como alternativas al agua entubada. Las tecnologías se pueden categorizar en dos grandes grupos: sistemas de micro-filtración y sistemas de captación pluvial. Los sistemas de micro-filtración son aquellos que aprovechan los recursos acuíferos cercanos a la localidad, como ríos, lagos e incluso el mar. Estas tecnologías filtran el agua para posteriormente llevarla a un depósito central o a cada hogar. Los sistemas de micro-filtración varían en capacidad y tamaño, tipo de agua que pueden filtrar (fresca, lodosa/pesada y salada), y fuente de energía (eléctrica o solar). Los sistemas de captación pluvial son aquellos que capturan la precipitación y la filtran, para depositarla en un tanque de almacenamiento central, un tinaco o cisterna a nivel hogar. Los sistemas de captación pluvial varían en capacidad y calidad de filtración.

En la base de tecnologías se incluyeron las siguientes variables: capacidad en litros por hora, peso, capacidad de almacenaje (en caso de sistemas de captación pluvial), requisitos de electricidad en términos de kilowatt hora, capacidad de filtración, presión requerida para operación, temperatura del agua mínima, temperatura del agua máxima, costo de tubería por metro, costo de 10 metros de superficie de captura de lluvia, costo de remplazo de filtros (anual), costo de tanque de almacenamiento, costo de bomba, costo variable anual (combustible y mantenimiento) y costo fijo.

#### *Supuestos asociados a restricciones de las tecnologías*

Las medidas operativas fueron útiles para determinar el nivel máximo de población que se podría suministrar con agua potable por la tecnología dada las condiciones geográficas y meteorológicas de la comunidad. Se consideró principalmente la información de capacidad,

peso y capacidad de almacenaje para este propósito. La medida de peso se utilizó como una restricción *ex ante* en el proceso de selección de las tecnologías, es decir antes de que se utilizara el modelo de optimización. Si la tecnología pesaba menos de una tonelada se consideró que se podría transportar con vehículos de carga ligera y por lo tanto con tal de que la comunidad tuviera una carretera a menos de cinco kilómetros sería viable el envío del producto. Si la tecnología pesaba más de una tonelada se requería transporte pesado y era necesario tener una carretera a menos de un kilómetro, de manera que fuera viable el envío. Se estimó un kilómetro de distancia mínima para transporte pesado pues al georeferenciarse la localidad no se tiene el área de extensión de la misma y la posición geográfica es un punto en vez de un polígono que generalmente representa el centro de la localidad. Esto quiere decir que a diferencia de municipios o estados para los que se tiene información del área que cubren, no se tiene información de la extensión precisa de las localidades y simplemente se estima la posición geográfica del centro de la localidad. Sobre todo en el caso de localidades pequeñas, la extensión máxima de la localidad es menor a un kilómetro por lo que se requería que la distancia sea similar de manera que se pueda conectar la carretera a los caminos internos de la comunidad.

Las variables de capacidad son importantes para determinar cuál tecnología o combinación de tecnologías se requiere para suministrar de agua potable a la comunidad. La medida de capacidad de los sistemas de micro-filtración se estandarizó a la capacidad de filtración de litros por hora. Estas medidas son esenciales para el modelo de optimización, que como se mencionará en la sección “Problema de optimización” son parámetros que determinan la combinación de tecnologías necesarias para minimizar los costos de suministro en la

comunidad. El suministro requerido para cada comunidad toma en consideración el tamaño de la población, donde se considera que la tecnología provea con por lo menos suficiente agua para cubrir las necesidades de agua para beber, cocinar y limpieza de cada persona. La ONU estima que el mínimo necesario para una vida adecuada es de 20 litros diarios por persona<sup>3</sup>. La medida de capacidad de almacenaje en el caso de los sistemas de captación pluvial también fue utilizada para determinar el requisito de las superficies de captura de lluvia, que sirvió para estimar el costo total de sistema.

#### *Costo de las tecnologías*

Las medidas de costos de la base de tecnología que están conformadas por costo de tubería por metro, costo de 10 metros de superficie de captura de lluvia, costo de remplazo de filtros (anual), costo de tanque de almacenamiento, costo de bomba, costo variable anual (combustible y mantenimiento) y costo fijo, fueron utilizadas en el modelo de optimización para encontrar la opción de tecnología o combinación de tecnologías más barata para cada comunidad. Con el objeto de ofrecer comparativos de las estimaciones de costos entre las tecnologías se tomó en consideración la vida útil y los periodos de remplazo de varios elementos necesarios en la operación de la tecnología como los filtros o las bombas. Se estimó el valor presente neto del costo de las tecnologías a 20 años que, en ausencia de estimaciones de vida útil para algunas tecnologías, es el promedio de vida útil de la mayoría de las tecnologías.

El valor presente neto del costo de los sistemas de micro-filtración consideró los siguientes costos: costo de remplazo de filtros, costo fijo de la tecnología, costo variable y

---

<sup>3</sup> Water World Assesment Program. [http://www.unwater.org/statistics\\_san.html](http://www.unwater.org/statistics_san.html)

costo de la bomba. Se estimó que los filtros se deben reemplazar cada año y las bombas cada cinco años. El costo variable se estimó utilizando un promedio de la tarifa por Kwh para servicios públicos de las diferentes regiones (5, 5 A y 6)<sup>4</sup> y se multiplicó por el consumo por hora de la tecnología bajo el supuesto de que la tecnología opere las 24 horas. La tasa de descuento que se utilizó fue de 4%, la cual es cercana a la tasa de CETES a un año.

El valor presente neto del costo para los sistemas de captación pluvial consideró los siguientes costos: costo de reemplazo de filtros, costo de bomba, costo de 10 metros de superficie de captura de lluvia y costo fijo de la tecnología. Al igual que con los sistemas de micro-filtración, se consideró que los filtros se deben reemplazar cada año y las bombas cada cinco años. Además se incluyó una medida de costo de 10 metros de superficie de captura de lluvia. Los sistemas de captación de pluvial capturan la lluvia sobre una superficie, generalmente techos, la cual se guía a un filtro central que purifica el agua para después depositarla en un tanque de almacenamiento. Idealmente se utilizaría los techos de los hogares para el sistema de captación pluvial, sin embargo, esto requeriría que varios hogares estuvieran muy cercanos uno al otro y como no se tiene información de la distancia entre hogares en una localidad, no hay manera de asegurar que ese fuera el caso. Inclusive resulta fácil suponer, sobre todo en comunidades rurales, que exista una amplia dispersión de los hogares al requerirse espacio para cultivos o cría de animales.

---

<sup>4</sup> Tarifas autorizadas CFE para servicios públicos DIC 2013.

[http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas\\_negocio.asp?Tarifa=CMAS&Anio=2013](http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=CMAS&Anio=2013)

### *Supuesto de los sistemas de captación pluvial*

Para solucionar dicha situación se consideró una manera sencilla de hacer uso de los sistemas de captación pluvial en todas las comunidades, independientemente de su nivel de dispersión. Se considera construir una superficie grande en alguna zona central de la localidad que sirviera el único propósito de capturar la lluvia. El tamaño de la superficie dependería de la población y se instalaría un conjunto de unidades de 10 metros cada una. Cada unidad de 10 metros de superficie es suficiente para cubrir el 100% de los requisitos de agua diarios de una persona si vive en una comunidad promedio con precipitación adecuada y 75% de los requisitos de agua diarios de una persona si vive en una comunidad en la cota baja de los niveles mínimos de precipitación para la implementación de tecnologías de captación pluvial. Para elegir cuándo era viable introducir tecnologías de captación pluvial, al igual que con las carreteras, se hizo un proceso de selección *ex ante* donde se determinó un requisito mínimo de precipitación anual. Se estableció que sólo aquellas comunidades que en su mes más bajo de precipitación tuvieran por lo menos 60 mm de precipitación y que en promedio anual tuvieran cuando mínimo 2000 mm de precipitación, tendrían suficiente lluvia para cubrir las necesidad de agua de los hogares durante todo el año. Este estimado se realizó con la calculadora de Rain Harvesting Systems<sup>5</sup>, la cual estima la capacidad de captura de lluvia de un techo dado un parámetro precipitación promedio anual donde se considera un 60% de eficiencia en captura de lluvia. Para estimar el número de unidades de 10 metros de superficies de captación de lluvia necesarios se consideró la capacidad de captura de la cota baja, es decir, cuando la

---

<sup>5</sup> "Rain Collection Calculator". Rain Harvesting Systems.

<http://www.rainharvestingsystems.com/Services/RainCollectionCalculator.aspx>



comunidad recibe un mínimo de 2000 mm de precipitación anual. Con 10 metros de superficie de captación de lluvia dado niveles de precipitación de 2000 mm, es suficiente para cubrir el 75% de los requisitos de agua diarios de una persona. Esta información se comparó con la capacidad de almacenaje de la tecnología de captación pluvial, de manera que se agregó 1.33 unidades de 10 metros de superficie por cada persona que puede suministrar la tecnología. Esto significa que si el sistema tiene capacidad para suministrar de agua a 100 personas, se agregó un costo adicional de 133 unidades de 10 metros de superficie. Cada unidad de 10 metros de superficie tiene un costo de 80 dólares, que es un estimado del precio de 10 metros de lámina de plástico barata. El costo de las superficies entra como parte del gasto fijo y se asume que tiene la misma vida útil de 20 años que la tecnología. La tasa de descuento que se utilizó fue de 4%, la cual es cercana a la tasa de CETES a un años.

#### *Base de datos de localidades*

El objetivo de construir la base de localidades fue tener la mayor información posible de las características particulares de cada localidad en México. La base de localidades se concretó con información de más de 20 bases de datos principalmente de CONABIO, CONAPO e INEGI. Las bases de datos meteorológicas y geográficas han sido acumuladas en el sitio de sistemas de información geográfica de la CONABIO y las bases socio-demográficas se obtuvieron del INEGI y CONAPO donde se consideraron los datos de la sección especial de Condiciones Socioeconómicas del Censo de Población y Vivienda 2010 y la base de datos del mapa de marginación de la CONAPO. Dichas bases de datos se agregaron utilizando el software de Sistemas de Información Geográfica Arcgis y se geo-referenciaron a nivel

localidad. Originalmente se había diseñado la base de localidades para incluir en la metodología de identificación todo tipo de tecnologías y consideraciones de requisitos de infraestructura por lo que en la base se incluyeron una serie de variables sociodemográficas, meteorológicas, geográficas y de terreno entre las que destacan: hipsometría, hidrografía, edafología, degradación del suelo, regímenes de humedad del suelo, rangos de humedad, precipitación media anual, isotermas, radiación solar por temporada, evapotranspiración real, actividades económicas en la localidad, índice de marginación, red de carreteras, condiciones socioeconómicas medidas por activos en el hogar, acceso a agua entubada, acceso a drenaje, acceso a electricidad, estado de la infraestructura del hogar, población por localidad y número de hogares por localidad.

El objetivo inicial del trabajo era ofrecer por lo menos una alternativa al agua entubada para cada localidad del país. Dicho objetivo requería que se incluyeran tecnologías para comunidades con características extremas, como comunidades en zonas desérticas o en alturas superiores a los 3500 metros sobre el nivel del mar. Dichas comunidades requieren tecnologías complejas como sistemas de filtración de agua negras a potable o sistemas de captación de humedad. Para instalar dichas tecnologías, sobre todo aquellas que requieren una instalación subterránea, se necesita considerar múltiples variables tales como la edafología, hipsometría y degradación del suelo.

Para estimar el costo se requiere hacer un análisis complejo donde no sólo se debe hacer un análisis del valor presente neto del costo de adquirir y operar las tecnologías, sino considerar una serie de condiciones para llevar a cabo la instalación. Por ejemplo, para el caso de sistemas de filtración de aguas negras, se requiere la construcción de

infraestructura subterránea, así como estimar la cercanía a carreteras para llevar maquinaria pesada para hacer la instalación. Adicionalmente se debe considerar el tipo de suelo pues varía el tipo de maquinaria que se debe usar, determinar el nivel de degradación del suelo para observar que tipos de sistemas de contención se necesitan, conocer la altura y temperatura para determinar el tipo de tubería y sistemas de bombeo necesarios para la distribución. Para esto último hay que considerar la concentración demográfica de la población para calcular la inversión en tuberías y, en el caso de que hubiera ya drenajes, si es necesario reemplazarlo o redirigirlo para conectar al sistema centralizado.

Para determinar el costo y viabilidad de implementación de muchas tecnologías se requerían diversas variables en la base original e información adicional que resulta difícil obtener sin hacer visitas de campo a las comunidades. Con tales consideraciones el análisis de costos se volvía extremadamente complejo y en muchos casos inviable dadas las restricciones de tiempo y acceso a la información. Por lo mismo muchas tecnologías se omitieron y las tecnologías que se mantuvieron, los sistemas de micro-filtración y los sistemas de captación de precipitación, se debió a que requieren menos información que la contenida en la base original.

La base de localidades, cuando se limita el análisis únicamente a sistemas de micro-filtración y sistemas de captación pluvial, requiere únicamente las siguientes variables: precipitación media anual, isothermas, hidrología, radiación solar por temporada, red de carreteras, condiciones socioeconómicas medidas por activos en el hogar, acceso a agua entubada, acceso a drenaje, población por localidad y número de hogares por localidad. Dichas variables están geo-referenciadas, lo que permite superponerlas sobre un mapa de

localidades del país para extraer la información de cada una de estas variables para cada localidad. Esto significa que se puede obtener un estimado de los niveles de precipitación, temperatura, niveles de radiación solar y condiciones socio-económicas de cada localidad.

Además se incluyó una medida de distancia del centro de la localidad a las carreteras y a la fuente de agua más cercana (hidrografía). Para medir las distancias se utilizó el software de Arcgis, el cual estima la distancia en términos de grados decimales de un punto al vector de puntos más cercano. Es decir, el sistema minimiza las distancias del centro de la localidad al punto más cercano de la carretera o fuente de agua. Dicha medida en grados decimales posteriormente se convirtió a metros.

Para medir la distancia a la fuente de agua más cercana, inicialmente se habían considerado los mapas de hidrografía provista en las bases de datos de la CONABIO. La información hidrológica que se tenía de dicha base estaba a una escala de 1:10.000.000 lo que implica que se tenía poco detalle de las fuentes de agua y se excluía lagos, lagunas y ríos pequeños; por lo tanto, se estimaba una distancia no necesariamente a la fuente de agua más cercana, sino a la fuente de agua más grande más cercana.

La información limitada empobrecía mucho el análisis pues se excluía por la distancia el uso de los sistemas de micro-filtración de un gran número de comunidades en los cuales podría resultar óptima dicha tecnología. Para obtener resultados más adecuados se buscó diferentes cartografías de agua en los principales centros de investigación meteorológicos de la ciudad, donde se obtuvo acceso al Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) desarrollado por INEGI y CONAGUA.

El SIATL provee información detallada de la dirección, fuerza y tipo de corriente de los flujos de agua de las diferentes regiones hidrológicas de México. Además el sistema está geo-referenciado a una escala 1:50.000, lo cual es 200 veces más detallado que los mapas de hidrografía de CONABIO, y ofrece información de si el río, lago o laguna es perenne (que significa que mantiene un nivel adecuado de agua todo año).

El uso del SIATL, sin embargo, tuvo un fuerte costo sobre el análisis general. Las bases de datos de SIATL tienen información muy detallada por lo que no se pueden procesar los cálculos de distancia de las localidades de todo el país a su fuente de agua más cercana en un equipo de cómputo personal. Se debe considerar que México tiene más de dos millones de localidades y, con una cartografía de hidrología a gran detalle, se tenía que minimizar la distancia a un número muy grande de puntos. Ante dicha situación se optó por restringir el análisis únicamente a la zona del estado de Oaxaca que está dentro de la región hídrica de Papaloapan. Se eligió esta región porque presenta una amplia diversidad de climas, tamaño de localidades y hay un gran número de hogares sin agua entubada. Esto permite que esta región sea ideal para probar la metodología de identificación de tecnologías. Cabe destacar que a pesar de restringir el análisis a una región, dicha metodología es generalizable para todo el país y el único requisito es tener un equipo de cómputo más poderoso pues se tiene información geográfica, meteorológica y socio-demográfica para todo México.

Las variables de la base de localidades son importantes para determinar qué tecnología se puede introducir a cada localidad. Se mencionó anteriormente que se establece un proceso de selección *ex ante*, es decir antes de resolver el problema de

asignación óptima, sobre cuáles comunidades cumplen las condiciones necesarias para implementar cada tecnología. Se intentó que este proceso de selección ex ante fuera lo menos restrictivo posible, de manera que a partir de resolver el problema de optimización se determinara la tecnología óptima y no las restricciones.

Como se comentó en el trabajo se consideran dos tipos de tecnologías: sistemas de captación pluvial y sistemas de micro-filtración. Los sistemas de captación pluvial tienen requisitos mínimos de lluvia para proveer de agua todo el año a cada miembro y los sistemas de micro-filtración necesitan tener una fuente de agua cercana para poder operar. En la sección de “Bases de datos de tecnologías” se comentó que se consideraba la distancia de una localidad a la carretera más cercana y el peso de la tecnología para determinar si era viable transportarla, y que se requería un mínimo de 2000 mm de lluvia al año para que fuera viable introducir un sistema de captación pluvial. Además de estas consideraciones se pide una medida adicional para los sistemas de micro-filtración que es que la comunidad esté a menos de 1 km de distancia de una fuente de agua perenne. En el caso de que la principal fuente de energía de la tecnología fuera solar se requirió que las comunidades tuvieran un mínimo de 180 días solares anuales.

El objetivo de la restricción era que para cada localidad se tuviera información de cuál de las tecnologías de la base era viable. Para realizar esto se crearon variables dicotómicas de las tecnologías que toman valor de 1 en caso de que sea viable implementarse en la localidad dada las restricciones y valor de cero en caso de que no fuera viable implementarse en la localidad. Es decir, para cada comunidad “j” se tiene 35 variables dicotómicas donde cada una representa a una tecnología diferente.

La base de datos de localidades para la región de Oaxaca que se encuentra en la región hídrica de Papaloapan originalmente contenía 2997 localidades. De estas se seleccionó aquellas en la cuales más del 90% no tuviera agua entubada, que son aquellas que más se beneficiarían de la implementación de las tecnologías pre-seleccionadas, lo cual redujo el análisis a 954 comunidades y, finalmente, cuando se restringió el análisis a aquellas comunidades donde fuera viable introducir alguna de las tecnologías de micro-filtración o captación pluvial por lo que la base final se compuso de 439 localidades.

#### Problema de optimización

El modelo de optimización busca seleccionar para las 439 localidades cuál de las 35 tecnologías o combinación de tecnologías es la más barata para suministrar con agua potable a toda la población de la localidad. A las localidades se les asignó el identificador “j” y a las tecnologías el identificador “i”, de manera que  $j \in J$  donde  $J=(1,\dots,439)$  e  $i \in I$  donde  $I=(1,\dots,35)$ .

Se formuló el problema de asignación óptima como una minimización entera lineal. Se obtiene el conjunto de soluciones de tecnología para cada localidad al mismo tiempo resolviendo:

$$\text{Min } \sum_j ( \sum_i X_{ij} C_i \delta_{ij} + \Omega_j (t d_j))$$

s.a.

$$\sum_i X_{ij} \delta_{ij} p_i \geq P_j$$

$$\sum_i X_{ij} M_{ij} \leq \Omega_j P_j$$

$X_{ij} \geq 0$ ,  $\Omega_j$  binario

Donde:

$X_{ij}$  representa el número de tecnologías "i" que requiere la localidad "j" y la variable toma valores enteros no negativos  $X_{ij}=1, \dots, n$ ;  $C_i$  es el valor presente neto de implementación de la tecnología "i" que se incluyó en la base de datos de tecnologías;  $\delta_{ij}$  es una variable binaria resultante del proceso de selección *ex ante* que toma valor de 1 si es viable introducir la tecnología "i" en la localidad "j" y 0 en caso contrario, donde se considera si es viable introducirla con base en la información de peso de la tecnología, distancia a la carretera de la comunidad, distancia a la fuente de agua más cerca y rango de precipitación;  $\Omega_j$  es una variable binaria que toma valor de 1 si en la localidad "j" se introduce por lo menos una tecnología de micro-filtración y 0 de lo contrario;  $t$  es una constante del costo fijo por metro de tubería que se requiere para extraer el agua de la fuente de agua más cercana a la localidad;  $d_j$  mide la distancia del centro de la localidad "j" a la fuente de agua más cerca;  $p_i$  es el número de personas a las cuales la tecnología "i" puede suministrar con por lo menos 20 litros de agua diarios;  $P_j$  es el número total de habitantes que hay en la localidad "j"; y  $M_{ij}$  es un contador de las tecnologías de micro-filtración en la comunidad "j".

La ecuación de minimización de costos elige en el componente  $\sum_i X_{ij} C_i \delta_{ij}$  la mínima combinación de tecnologías viables para la comunidad "j" donde se considera el costo asociado a construir una tubería de suministro de agua para las tecnologías de micro-filtración en el componente  $\Omega_j (t d_j)$ . La restricción  $\sum_i X_{ij} \delta_{ij} p_i \geq P_j$  para  $j=1, \dots, m$  considera que la el suministro que puedan proveer la combinación de tecnologías óptimas sean mayor



o igual a los requeridos por la localidad “j”. La restricción  $\sum_i X_{ij} M_{ij} \leq \Omega_j P_j$  es una restricción operativa para el modelo, donde se condiciona el contador de tecnologías de micro filtración a mantenerse menor o igual a los requisitos por dicha tecnología de la comunidad “j”.

#### *Supuestos adicionales para implementar el modelo*

Para estimar el costo de la tubería se enfrentó a varios conflictos pues el tipo de tubería, grosor y costos de instalación dependen de las características de la localidad y de la región. Los estimados disponibles de las compañías de agua regionales del costo de la tubería toman en consideración que en la comunidad ya haya previamente una instalación, donde se considera únicamente el costo de la instalación y el costo fijo de la tubería que es de un diámetro suficiente para un solo hogar. Sin embargo dicho estimado de costo no se puede utilizar pues cuando consideramos el tipo de tubería necesario para los sistemas de micro-filtración requerimos dos tipos de tubería: la que trae el agua de la fuente de agua más cerca y la que distribuye al hogar. Para aclarar el proceso se incluye el siguiente diagrama de la organización holandesa Sam Sam Water<sup>6</sup>, la cual se especializa en la implementación de sistemas de agua en países en desarrollo.

---

<sup>6</sup> Trifunovic, Nemanja. “Water Distribution” SamSam Water.  
[http://www.samsamwater.com/library/TP40\\_21\\_Water\\_distribution.pdf](http://www.samsamwater.com/library/TP40_21_Water_distribution.pdf)

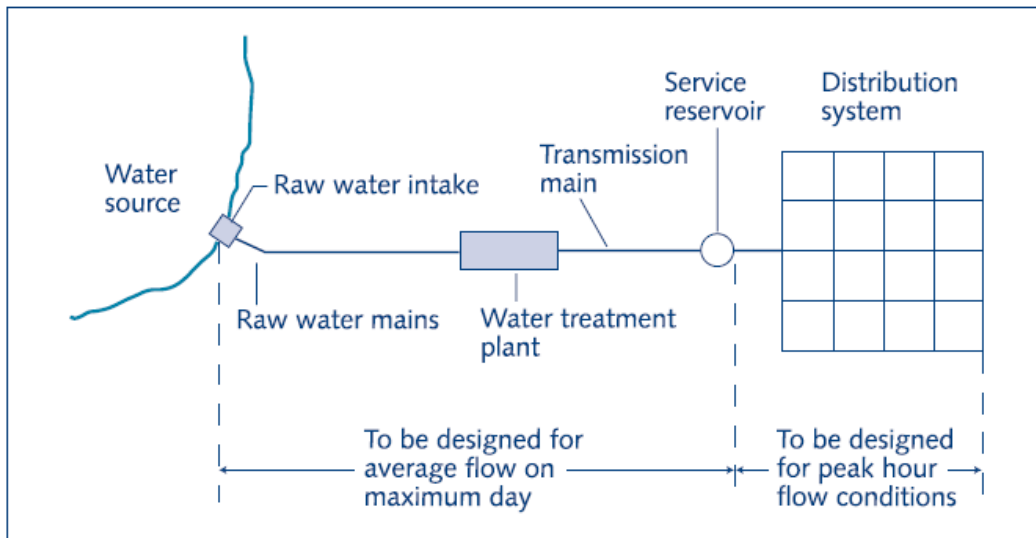


Fig. 21.10. Design capacities for water supply system components

Como podemos observar la planta de tratamiento de agua, en este caso los sistemas de micro-filtración, se localiza en un intermedio entre la fuente de agua y la comunidad. Las tuberías que traen el agua de la fuente de agua al sistema de micro-filtración y que posteriormente, una vez que se realiza el proceso de filtrado, se desplazan a un tanque de contención central, tienen un diámetro mucho mayor al de las tuberías que se requieren para la distribución a los hogares pues llevan toda el agua que se utiliza en la población. Para efectos ilustrativos esto quiere decir que para una comunidad de 100 hogares la tubería que lleva el agua al sistema de micro-filtración es 100 veces más gruesa que la de los hogares. Además, dadas las condiciones del terreno, la tecnología se coloca en diferentes puntos, sea muy cerca del río o mucho más cerca de la comunidad, lo cual varía los requisitos de cada tipo de tubería de una comunidad a otra. Puesto que no podemos estandarizar el costo de la tubería dados los requisitos heterogéneos de cada comunidad

por los dos tipos de tubería, para propósitos de simplificación de análisis se consideró únicamente el costo de la tubería que suministra a los sistemas de micro-filtración. Este costo se determinó con datos provistos por la empresa Global Hydration<sup>7</sup>, donde la empresa estima que en promedio el costo es de 360 dólares por cada 25 pies de distancia o aproximadamente 46 dólares por metro lineal.

## Costos

Nuestro enfoque no realiza un comparativo de costos de las tecnologías alternativas contra los costos de introducir agua entubada, pues no se tiene suficiente información para realizar dicho comparativo. Para estimar los costos de conectar a una comunidad con agua entubada se necesitaría información de: costos de instalación de tubería, considerando los costos de excavación a diferentes alturas y con diferentes tipos de suelo y niveles de degradación; tipo de tubería, donde se necesita información de los flujos en temperatura de la comunidad; grosor de tubería, dependiendo del tamaño de la población; concentración demográfica de la localidad; distancia a la tubería principal más cercana y si se requiere ampliaciones en capacidad para cubrir a la localidad; costos variables de operación de la planta tratadora de agua, entre otras variables. Puesto que dicho análisis es muy complejo y se requiere información muy puntual, sólo se compararán las tecnologías bajo el supuesto de que instalar las tuberías en todos los hogares resulta más caro.

---

<sup>7</sup> Esta información fue provista gracias al apoyo de Andrew Moorey, CEO de Global Hydration. La información fue provista en el documento "GH List Pricing SPECTRUM 2013". <http://globalhydration.com/>

## Resultados

El modelo se corrió con el software de optimización lineal Lingo de Lindo Systems. En el proceso se utilizaron las bases de datos de tecnologías y la base de datos de localidades. El sistema buscó todas las combinaciones viables de tecnologías de manera que se minimizara el costo total de la implementación en cada localidad. El reporte del proceso de optimización ofrece tres tipos de resultados importantes: si en la comunidad se utilizó sistemas de micro-filtración o sistemas de captación pluvial, el cual se estima por el resultado de la variable dicotómica  $\Omega_j$  donde si toma valor de 1 indica que en la comunidad es óptimo el uso de por lo menos una tecnología de micro-filtración y si toma valor de 0 es que en la comunidad es óptimo el uso de sistemas de captación pluvial; el contador de tecnologías de micro filtración, que está estimado por  $M_{ij}$ ; y el número de tecnologías requerido para suministrar a la población, estimado por  $X_{ij}$ .

## Limitaciones

El software que se utilizó, Lingo de Lindo systems, es un software de optimización lineal que encuentra soluciones para problemas de enteros y fracciones. El programa funciona óptimamente cuando resuelve problemas de fracciones lo que permite encontrar las soluciones en un periodo corto de tiempo. Dado que no se puede comprar una fracción de una tecnología de la base de datos, la optimización se planteó con un problema de enteros. La optimización se vuelve más compleja para el sistema de computar puesto que busca todas las combinaciones posibles para cada una de las localidades. Esta operación requiere un número muy grande de iteraciones y un equipo de cómputo muy poderoso para realizar

el análisis. En este caso, el análisis se tuvo que restringir a 4 horas de haber iniciado el cálculo pues después de varios intentos el sistema se colapsó antes de computar por completo. A 4 horas de análisis el número de iteraciones superó 10,000,000. Los resultados que se presentan a continuación son aquellos que se obtuvieron en el periodo de cuatro horas. Es posible que en el cálculo final hubiese algunos cambios menores en los resultados; sin embargo, dadas las limitaciones de equipo de cómputo, no es posible determinarlo.

### *Resultados generales*

El reporte de resultados indica que para las 439 localidades se requieren 179 sistemas de micro-filtración y 294 sistemas de captación pluvial, lo que indica que varias de las localidades requieren más de una tecnología. En total 30 de ellas requieren dos tecnologías y 4 de ellas requieren tres tecnologías en la localidad para suministrar adecuadamente a la población al menor costo posible. Todas las comunidades que necesitan más de una tecnología son de captación pluvial y no hay ninguna incidencia de combinaciones entre captación pluvial y sistemas de micro-filtración. Lo anterior indica que los costos de infraestructura asociados a las tecnologías son altos y muy significativos para el proceso de selección de tecnologías.

### *Sistemas de micro-filtración*

Los sistemas de micro-filtración fueron menos atractivos en las comunidades que los sistemas de captación pluvial. Además, de las 23 tecnologías de micro-filtración en la base de tecnologías, sólo fueron óptimos 4 tecnologías. La más popular fue Solar UF de Aqualyng con 79 sistemas demandados seguido por Spectra LBF-2800 de Spectra Water Technologies

con 60, Portable UF de Aqualyng con 38 y Can Pure 5 de WPS technologies con 2 sistemas demandados. Resulta interesante que dos de las tecnologías que son principalmente de energía solar, Solar UF y Portable UF, fueron las más demandas donde representan más del 50% del total. Lo anterior puede indicar que uno de los principales costos asociados a la tecnología es su costo operativo, lo cual puede explicar que se eligieran más tecnologías de captación pluvial sobre tecnologías de micro-filtración.

### *Sistemas de captación pluvial*

Los sistemas de captación pluvial fueron, en general, la opción más barata para suministrar de agua a las poblaciones de las localidades. De las 11 tecnologías de captación pluvial en la base de datos de tecnologías, sólo 6 fueron óptimas. La más popular fue la Rainmaster 865 con 97 tecnologías demandadas seguido por la Rainmaster 450 con 92, Rainmaster 5100 con 48, Rainmaster 350 con 38, Rainmaster 3400 con 17 y Rainmaster 10000 con 2 tecnologías demandas. Las tecnologías más populares de captación pluvial son relativamente pequeñas, con una capacidad de almacenaje promedio de aproximadamente 2500 litros. Lo anterior puede explicar que en varias comunidades se requiera una combinación de tecnologías para suministrar óptimamente a la comunidad.

### *Conclusiones*

La primera parte de este estudio intentó mostrar, a manera de justificación de la relevancia de mejorar la infraestructura de agua de los hogares, cuál era el efecto de pasar de acarrear agua de fuentes expuestas a contaminantes a pasar a tener agua entubada en el hogar. Se mostró que había importantes cambios en la calidad de vida de las personas, donde había reducciones a la incidencia de los síntomas asociados a las enfermedades gastrointestinales,

re-asignación de tiempo de actividades domésticas y acarreo a actividades recreativas como leer y usar el internet, y una mejor percepción de vida. Dicho estudio tenía limitantes en cuanto al número de observaciones y a la posible contaminación de los datos por la mala calidad del agua y el bajo suministro del agua entubada en ciertas comunidades, las cuales no permitían observar el impacto real de una mejora a la infraestructura. El problema del poco número de observaciones se podría resolver mediante un diseño experimental similar al de Devoto et al (2012) donde se ofreciera a los hogares que no tienen agua entubada algún tipo de crédito subsidiado para conectarlos al sistema nacional de agua. El problema de contaminación de datos por mala calidad de agua y suministro inadecuado se podría controlar al incluir en el estudio medidas de calidad de agua o a través de cuestionarios a los hogares de cómo perciben la coloración, textura, sabor y calidad del agua que reciben, y si confían en ella para beberla. Además se les podría preguntar cuántas horas de agua tienen al día, qué tan frecuente se quedan sin agua y cuál es la principal fuente alternativa que utilizan para cubrir sus necesidades básicas.

En la segunda parte del estudio se diseñó un modelo de optimización para intentar de elegir en comunidades que no tienen agua entubada cuál de las alternativas viables dadas las condiciones particulares de cada localidad del país era más barata para suministrar de agua potable a toda su población. La metodología de optimización enfrentó tres principales problemas: no fue posible estimar los costos para muchas de las tecnologías disponibles actualmente en el mercado, sea por dificultad para encontrar el precio de la tecnología o para estimar el costo que tendría instalar y operar dicha tecnología; no fue posible procesar todas las comunidades del país dadas restricciones de capacidad del equipo, lo cual limitó

el análisis a una región representativa; y no se pudo estimar el costo de instalación del agua entubada para las localidades, de manera que no se pudo comprobar si realmente era preferible la implementación de la tecnología alternativa que el modelo de optimización determinó que era óptima.

Las complicaciones presentadas anteriormente se pueden resolver con más tiempo, mejor equipo de cómputo y con una investigación de campo en las localidades. Esta primera aproximación al tema, sin embargo, provee un buen indicador de las condiciones de las localidades y de la viabilidad para implementar las tecnologías de micro-filtración y captación pluvial. La información de la metodología de identificación de tecnologías, a pesar de que actualmente no puede realizar un comparativo más sofisticado de costos, sirve para determinar en cuáles localidades del país se puede introducir una tecnología de captación pluvial y de micro-filtración. Además, como se ofrece información de los costos aproximados de las tecnologías y qué combinación de estas es óptima para la comunidad, si se conoce el presupuesto que un municipio tiene para ampliar la red de tuberías en una comunidad sin agua entubada, si el costo las tecnologías óptimas es significativamente menor al presupuestado al de la expansión de tuberías, se podría realizar una recomendación para la implementación de la tecnología alternativa óptima. Si bien el análisis no es perfecto, sigue siendo muy útil para realizar sugerencias de política pública.



## Bibliografía

1. S. A. Esrey, J. B. Potash, L. Roberts, C. Shiff Effects of improved water supply and sanitation on ascariasis, diarrhoea, dracunculiasis, hookworm infection, schistosomiasis, and trachoma. *Bull World Health Organ.* 1991; 69(5): 609–621.
2. Fewtrell, L. and Colford, J. M., Jr. (2004) *Water, sanitation and hygiene: interventions and diarrhoea: a systematic review and meta-analysis.* Health Nutrition and Population Discussion Paper. Washington, DC: World Bank.
3. Florencia Devoto & Esther Duflo & Pascaline Dupas & William Parienti & Vincent Pons, 2012. "Happiness on Tap: Piped Water Adoption in Urban Morocco," *American Economic Journal: Economic Policy*, American Economic Association, vol. 4(4), pages 68-99, November.
4. Kremer, Michael, Jessica Leino, Edward Miguel, and Alix Peterson Zwane. 2011. *Spring Cleaning: Rural Water Impacts, Valuation, and Property Rights Institutions.* *Quarterly Journal of Economics* 126, no. 1: 145-205.
5. Pattanayak, S.K., J.C. Yang, D. Whittington, & Bal Kumar K.C. "Coping with Unreliable Public Water Supplies: Averting Expenditures by Households in Kathmandu, Nepal." *Water Resources Research* 41.2 (2005)
6. Shuval HR, Tilden RL, Perry BH, Grosse RN. Effect of investments in water supply and sanitation on health status: a threshold-saturation theory. *Bulletin of World Health Organization* 1981; 59(2); 243-248.

7. Shanti Gamper-Rabindran, Shakeeb Khan, Christopher Timmins, The impact of piped water provision on infant mortality in Brazil: A quantile panel data approach, Journal of Development Economics, Volume 92, Issue 2, July 2010, Pages 188-200
8. Trifunovic, Nemanja. "Water Distribution" SamSam Water. [http://www.samsamwater.com/library/TP40\\_21\\_Water\\_distribution.pdf](http://www.samsamwater.com/library/TP40_21_Water_distribution.pdf)
9. Base de datos sobre conflictos de Agua aparecidos en prensa nacional durante el periodo 1990-2002. INE 2003. <http://www.inecc.gob.mx/areas/dgipea/276-aguabdconflictos>
10. Censo de Población y Vivienda 2010. INEGI. <http://www.censo2010.org.mx/>
11. Encuesta Nacional de Ingreso y Gasto de los Hogares (ENIGH) 2010. INEGI. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/encuestas/hogares/regulares/enigh/>
12. Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010. CONAPO. <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/>
13. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Lugo-Hupb J., Vidal Zepeda, R., Fernández-Equiarte, A., Gallegos-García, A., Zavala-H, J. y otros, (1990). 'Hipsometría'. Extraído de Hipsometría y Batimetría, I.1.1. Atlas Nacional de México. Vol. I. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México
14. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1999). 'Índice de cartas 1:50000'. Escala 1:50000. Extraído del Inventario de Información Geográfica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI-1992), México.

15. García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Climas' (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
16. Maderey-R, L. E. y Torres-Ruata, C. (1990), 'Hidrografía'. Extraído de Hidrografía e hidrometría, IV.6.1 (A). Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
17. Maderey-R, L. E. y Torres-Ruata, C. (1990), 'Hidrografía'. Extraído de Hidrografía e hidrometría, IV.6.1 (A). Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
18. Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1995). 'Edafología'. Escalas 1:250000 y 1:1000000. México.
19. SEMARNAT, Dirección de Geomática, (2004). 'Degradación del suelo en la República Mexicana - Escala 1:250 000.', escala: 1:250000. México, Distrito Federal.
20. Maples - Vermeersch M. (1992) 'Regímenes de humedad del suelo' en Hidrogeografía IV.6.2 Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México
21. García, E. (1990), 'Rangos de humedad'. Extraído de Climas. IV.4.10. Atlas Nacional de México. Vol II. Escala 1: 4000000. Instituto de Geografía UNAM. México.
22. Vidal-Zepeda, R. (1990), 'Precipitación media anual' en Precipitación, IV.4.6. Atlas Nacional de México. Vol II. Escala 1 :4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México
23. García, E. - CONABIO, (1998). 'Isotermas Medias Anuales'. Escala 1:1000000, México.

24. Pérez-Villegas, G. (1990). 'Insolación Anual' en Observatorios, Estaciones Meteorológicas e Insolación. IV.4.1 Atlas Nacional de México, Vol. II. Escala 1:8000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
25. Maderey Laura E., (1990). 'Evapotranspiración real' en Hidrogeografía IV.6.6. Atlas Nacional de México. Vol. II Escala 1 4000000. Instituto de Geografía UNAM. México.
26. CONABIO, (2012). 'Grados de marginación a nivel localidad, 2010', Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
27. Digital Chart of the world. (1985.). 'Red de carreteras'. Escala 1: 1000000. México
28. Simulador de Flujos de Agua de Cuencas hidrográficas (SIATL). INEGI.  
[http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/SIATL/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#)

## Anexos

### Anexo 1: Resultados econométricos

VARIABLES	diarre a	naus ea	dolorest omago	dep orte	tele	leyo	coci na	lavar ropa
adecuada beber	- 0.002 78	- 0.000 793	-0.0119 (0.0154)	0.41 5	- 0.49 4	1.71 7**	- 0.32 9	- 0.01 96
	(0.01 14)	(0.01 16)		(2.3 80)	(0.49 1)	(0.8 03)	(0.5 00)	(0.55 3)
adecuada hogar	- 0.001 37	- 0.004 58	-0.0114 (0.0099 7)	1.04 0	0.05 94	- 0.51 9	0.65 8**	- 0.66 0*
	(0.00 740)	(0.00 753)		(0.9 75)	(0.28 3)	(0.3 93)	(0.3 25)	(0.35 6)
drenaje adecuado	- 0.028 5***	- 0.025 8***	- 0.0424** *	0.12 5	- 0.32 1**	0.62 1***	0.28 9	- 1.07 3***
	(0.00 418)	(0.00 425)	(0.0056 4)	(0.4 90)	(0.15 5)	(0.2 09)	(0.1 93)	(0.20 7)
garrafón	- 0.005 72	- 0.008 42	- 0.00610 (0.0111)	- 1.30 3	- 0.05 95	0.17 4	- 0.50 8	- 0.03 43
	(0.00 822)	(0.00 835)		(1.1 37)	(0.31 4)	(0.4 40)	(0.3 61)	(0.39 7)
Bici								
Vehículo								
electrónicos								
Estufa								
electrodomestico								
Constant	0.090 8***	0.097 6***	0.193*** (0.0145)	6.38 0***	13.4 0***	4.01 8***	11.0 3***	10.8 9***
	(0.01 08)	(0.01 10)		(2.2 29)	(0.46 7)	(0.7 72)	(0.4 75)	(0.52 3)
Observations	39,93 5	39,93 2	39,931	5,31 1	34,0 88	14,4 46	21,9 79	23,2 70
R-squared	0.004	0.003	0.005	0.00 3	0.00 1	0.00 5	0.00 1	0.00 5

Number of pid_link	25,22 4	25,22 3	25,223	4,76 8	22,9 32	11,5 54	14,8 07	15,7 94
r2	0.003 64	0.003 23	0.00484	0.00 290	0.00 0537	0.00 532	0.00 106	0.00 518
F	13.43	11.91	17.90	0.39 2	1.49 9	3.86 1	1.90 6	9.72 1
p>F (95%)	si	si	si	no	no	si	no	si
Standard errors in parentheses								
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1								

VARIABLES	cuidó anciano	ayudó a estudiar	internet	acarreo de agua	dormir mejor	mejor vida	mejor vida	mejorar vida	mejorar vida
adecuado a beber	-1.927 (2.771)	-1.012 (1.341)	1.145 (5.191)	-0.836 (0.967)	0.0880* (0.0524)	0.0188 (0.0198)	0.0960* (0.0499)	0.00505 (0.0212)	-0.0120 (0.0536)
adecuado a hogar	-0.361 (1.861)	-0.933 (0.777)	0.246 (1.814)	-2.086 (1.332)	0.0221 (0.0341)	0.00824 (0.0129)	0.00488 (0.0348)	0.0252* (0.0138)	-0.0336 (0.0374)
drenaje adecuado	-1.438 (1.097)	-0.114 (0.398)	2.145** (0.823)	1.964* (0.817)	0.0345* (0.0192)	0.0967*** (0.00728)	0.0994*** (0.0157)	0.146** (0.00778)	0.130** (0.0168)
Garrafón	-1.357 (2.049)	1.868** (0.855)	0.458 (2.129)	2.880* (1.285)	0.0565 (0.0378)	0.0362** (0.0143)	0.0254 (0.0374)	0.00788 (0.0153)	0.0375 (0.0402)
Bici							0.0238** (0.0113)		0.0235* (0.0121)
Vehículo							0.0174 (0.0136)		0.0148 (0.0146)

Electrónicos							-	0.00770	-0.0189
								(0.0208)	(0.0223)
Estufa							-	0.0329	-0.0197
								(0.0200)	(0.0215)
Electrodo mestico							-	0.00810	0.0195
								(0.0187)	(0.0200)
Constant	30.70**	6.274***	7.705	5.876**	7.844***	0.319***	0.554***	0.537**	0.534**
	(2.644)	(1.273)	(4.862)	(0.625)	(0.0494)	(0.0187)	(0.0630)	(0.0200)	(0.0676)
Observations	10,273	6,752	2,929	2,335	40,021	40,079	12,045	40,079	12,045
R-squared	0.002	0.005	0.022	0.032	0.001	0.015	0.026	0.025	0.032
Number of pid_link	8,508	5,824	2,550	2,034	25,219	25,237	9,788	25,237	9,788
r2	0.00236	0.00528	0.0219	0.0324	0.00647	0.0148	0.0265	0.0252	0.0323
F	1.042	1.225	2.100	2.487	2.397	55.57	6.798	95.95	8.328
p>F (95%)	no	no	si	si	si	si	si	si	si

Anexo 2: Resultados de tecnologías

Tecnología	número en comunidades	nombre tecnología
1	0	Spectra A-150
2	0	Spectra A-200
3	0	Spectra A-360
4	0	Spectra E-150
5	0	Spectra E-200
6	0	Spectra LBF-1800
7	60	Spéctra LBF-2800
8	0	Spectra LBF 4000
9	0	Spectra LBF 10000
10	2	Can Pure 5
11	0	Can pure 4
12	0	Water Miracle
13	0	MMP serie 1
14	0	MMP serie 2
15	0	MMP series 3
16	0	DWS 20000 PV
17	0	DWS UFWP
18	79	Solar UF
19	38	portable UF
20	0	Fast water 500



21	0	fast water 1000
22	0	Siemens mobile
23	0	GE MobileRO
24	0	Rainmaster 1700
25	17	Rainmaster 3400
26	48	Rainmaster 5100
27	2	Rainmaster 10000
28	38	Rainmaster 350
29	92	Rainmaster 450
30	97	Rainmaster 865
31	0	Rainmaster 10000
32	0	Rainmaster 15000
33	0	Rainmaster 20000
34	0	Rainmaster 25000
35	0	Raimaster 30000