



**Universidad Autónoma de Ciudad Juárez**

**Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte**

**Departamento de Arquitectura**

**Doctorado en Estudios Urbanos**

**“Disponibilidad de Agua Subterránea y su relación con el  
Desarrollo Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua: Un  
análisis retrospectivo y prospectivo durante el periodo  
2008 al 2030”**

Tesis para obtener el grado de

Doctor en Estudios Urbanos

M.I. Arturo Soto Ontiveros

“Becado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología”

**Bajo la Dirección del**

**Dr. Alfredo Granados Olivas**

Ciudad Juárez, Chihuahua, Marzo 2019

## RESUMEN

La dirección del flujo de agua subterránea se modeló matemáticamente al aplicar una predicción geoespacial del desarrollo urbano que fue determinada por el Instituto Municipal de Investigación y Planificación (IMIP). El Acuífero Bolsón del Hueco fue modelado durante un período de 6 años (2008-2014) y caracteriza las direcciones del flujo de agua subterránea mientras se proyecta hacia el futuro (2030). Los procedimientos de modelación geoespacial se aplicaron utilizando el programa informático Visual ModFlow Clásico, utilizando información sobre aguas subterráneas de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) para los años 2008 y 2014.

Se realizó un segundo análisis paralelo en relación con el crecimiento de la población. Se recopiló la información disponible sobre los habitantes de Ciudad Juárez, Chih., Y se realizó un análisis estadístico exhaustivo de la población. Se generó un análisis de cómo la población se expandió geográficamente en los últimos 115 años, identificando un crecimiento alto y bajo de la población, regulando las tendencias ascendentes de la población a través del tiempo.

Los resultados del modelado de los acuíferos muestran que el bombeo continuo con una tendencia de "como de costumbre" sin ninguna estrategia administrativa significativa, los niveles estáticos de agua del Acuífero de Bolsón de Hueco podrían tener un agotamiento con un promedio de 5.25 m/año. Un segundo escenario, considerando un aumento en el bombeo de agua subterránea de 52,602 m<sup>3</sup>/día debido al aumento potencial de la población (+194,835 habitantes), los niveles estáticos del agua en el Acuífero de Bolsón de Hueco podrían tener una reducción promedio de aproximadamente 6.72 m/año. En general, el análisis muestra que durante el lapso de tiempo modelado (16 años) el agotamiento promedio del acuífero del primer escenario está en el rango de 5 m / año; con un aumento en la población, el agotamiento de los acuíferos podría alcanzar hasta 7 m / año.

Además, el agotamiento de este acuífero podría llevar a una disminución en la calidad del agua subterránea, también podría limitar o restringir el crecimiento urbano, podría también tener un impacto ambiental con la reducción del flujo de la base en los ríos y la reducción del crecimiento de la vegetación nativa o incluso la pérdida del ecosistema debido a la completa Degradación del flujo de agua subterránea.

Se necesitan nuevas políticas de desarrollo urbano para promover la sostenibilidad de los acuíferos. Además, el desarrollo urbano y su relación con la expansión espacial de la expansión urbana se relacionaron en este estudio que vincula la dirección de los flujos subterráneos a la expansión geoespacial de la ciudad para cada uno de los años modelados propuestos.

**Palabras clave:** Bolsón del Hueco, Modelación Geoespacial, Agua Subterránea, Dirección de Flujo.

## **ABSTRACT**

The direction of groundwater flow was mathematically modeled while applying a geospatial prediction of the urban development which was determined by the Municipal Institute of Research and Planning (IMIP). The Hueco Bolson Aquifer was modeled over a period of 6 years (2008-2014) and characterize the directions of groundwater flow while projecting it into the future (2030). Geospatial modeling procedures were applied using the Visual ModFlow Classic computer program, using groundwater information from the Municipal Water and Sanitation Utilities (JMAS) for the years 2008 and 2014.

A second parallel analysis was accomplished in relation to population growth. Available information regarding inhabitants for Ciudad Juarez, Chih., was collected and a thorough statistical analysis of the population was carried out. An analysis of how population expanded geographically in the last 115 years was generated, identifying high and low population growth, with governing ascending population trends thru time.

Aquifer modeling results show that continuous pumping with a trend of “business as usual” without any significant administrative strategies, static water levels of the Hueco Bolson Aquifer could have a depletion with an average of 5.25 m/yr. A second scenario, considering an increase in groundwater pumping of 52,602 m<sup>3</sup>/day due to potential population increase (+194,835 habitants), static water levels at the Hueco Bolson Aquifer could have an average drawdown of approximately 6.72 m/yr. Overall, the analysis shows that during the time span modeled (16 years) the first scenario (Business as Usual) average aquifer depletion is on the range of 5 m/yr; with an increase in population aquifer depletion could reach up to 7 m/yr.

Furthermore, this aquifer depletion could lead to a decrease in groundwater quality, could also limit or restrict urban growth, could also environmentally impact with the reduction of base flow into rivers and reducing native vegetation growth or even the loss of the ecosystem due to the complete degradation of groundwater flow.

New urban development policies are needed to promote aquifer sustainability. Furthermore, urban development and its relationship with spatial expansion of the urban sprawl was related on this study linking the direction of underground flows to geospatial expansion of the city for each of the proposed modeled years.

**Keywords:** Bolson del Hueco, Geospatial Modeling, Groundwater, Flow Direction.

## **A Dios**

Por darme la vida, haciendo posible lograr mis metas, porque me iluminas y estas siempre a mi lado.

## **A mis Padres**

Porque me dieron su vida llena de amor; por brindarme la oportunidad de ser profesionista. A Ella; Porque sacrifico todo por darme escuela, llenó mi vida de ilusiones y de sabios consejos, dándome su apoyo en el momento más difícil de mi vida.

A Él; Porque con su silencio y una mirada me enseñó el respeto y la confianza, fue una de las personas que más he querido y que lamentablemente no pudo estar presente para vez realizado su sueño, el de ver a su hijo con un título universitario, por lo que en tu memoria te ofrezco 3

## **A mis Hermanos**

Por haberme brindado su apoyo moral, que lograron reafirmar mis metas.

## **A mi esposa e hijos**

A mi esposa Guille el amor de mi vida, gracias por el apoyo, comprensión y ternura que me brindaste en todo momento, estimulando esta fase de mi vida de estudiante y alentándome para lograr cumplir mis aspiraciones.

A mis hijos Marlene, Guillermo y Gabriel por ser la ilusión más grande de mi vida, por el tiempo que a ustedes les pertenecía y que altruistamente me concedieron con amor.

## **A mi familia directa e indirecta**

Gracias porque de alguna forma han influido en mi formación personal

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que me otorgó el voto de confianza de contar con una beca en un programa nacional de posgrado de calidad.

La realización de esta tesis fue posible por la participación y apoyo de distintas instituciones a las cuales expreso mi agradecimiento en especial a la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento y a la Comisión Nacional del Agua.

A mis profesores del programa doctoral, que fueron parte fundamental en mi formación académica que se manifestó cada día en el aula. En especial al Dr. Salvador Salazar Gutiérrez por su destacada Coordinación del Programa

A mis compañeros de generación que fueron un apoyo importante en estos tres años de formación.

A los apreciados miembros del sínodo, al Dr. Luis Carlos Bravo por siempre estar dispuesto a ofrecerme una asesoría haciendo un espacio dentro de su ajustada agenda, al Dr. Sergio Saul Solís por siempre estar detrás de mí, dándome consejos y haciendo ver mis errores, al tiempo que ha dedicado en su corrección, al Dr. Josiah McC. Heyman por aceptar ser parte del sínodo y ofrecer su experiencia, al Dr. Adán Pinales Munguía por ser una parte fundamental dentro de esta investigación, ya que sin su conocimiento y apoyo no hubiera sido posible sacar adelante este proyecto, y por último a mi maestro asesor y guía el Dr. Alfredo Granados Olivas, mi más absoluto respeto admiración y agradecimiento, por brindarme la confianza y tenerme fe para la realización de dos etapas fundamentales en mi formación académica, la maestría y el doctorado.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

MUCHAS GRACIAS.....

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN</b> .....	ii
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>Tabla de contenido</b> .....	vi
<b>Lista de Figuras</b> .....	ix
<b>Lista de Tablas</b> .....	xi
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1 Acuífero Valle de Juárez</b> .....	4
<b>1.2 Descripción del Área de Estudio</b> .....	5
<b>1.2.1 Fisiografía</b> .....	7
<b>1.2.2 Provincia Fisiográfica</b> .....	7
<b>1.2.3 Geomorfología</b> .....	8
<b>1.2.4 Clima</b> .....	9
<b>1.2.5 Hidrografía</b> .....	10
<b>1.2.6 Geología</b> .....	10
<b>1.3 Recursos Hídricos Existentes.</b> .....	24
<b>1.3.1 Agua Superficial</b> .....	25
<b>1.3.2 Agua Subterránea</b> .....	28
<b>1.4 Volúmenes Extraídos</b> .....	31
<b>1.5 Planteamiento del Problema</b> .....	38
<b>1.6 Crecimiento Demográfico</b> .....	40
<b>1.7 Cambios de Uso de Suelo</b> .....	52
<b>1.8 Estudios Previos</b> .....	66
<b>1.9 Marco Teórico</b> .....	71
<b>1.9.1 La planeación y el desarrollo urbano</b> .....	71
<b>1.9.2 La Planeación urbana y Medio ambiente</b> .....	71
<b>1.9.3 Agua</b> .....	74
<b>1.9.4 Disponibilidad Hídrica</b> .....	75
<b>1.9.5 Desarrollo urbano y su relación hídrica</b> .....	78
<b>1.9.6 Acuíferos y su disponibilidad</b> .....	80
<b>1.9.7 Sustentabilidad Hídrica</b> .....	81
<b>1.9.8 Desarrollo sustentable</b> .....	83
<b>1.9.9 Desarrollo Urbano y su relación con las aguas subterráneas</b> .....	85
<b>1.10 Hipótesis</b> .....	86

1.11 Objetivo General .....	87
1.12 Objetivos particulares.....	87
1.13 Justificación .....	87
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>91</b>
2.1 Proyección de la población al 2030 .....	91
2.2 Proyecciones de la población futura para un horizonte de 15 años (2030).....	94
2.3 Crecimiento urbano histórico de Ciudad Juárez Chihuahua. ....	98
2.4 Crecimiento urbano 2015-2020-2030.....	101
2.5 Proyección del crecimiento urbano para un horizonte al 2020 .....	104
2.6 Proyección del crecimiento urbano para un horizonte al 2030.....	108
2.7 Modelo Matemático.....	112
2.7.1 Modelo matemático en MODFLOW (Ecuación de flujo).....	115
2.7.3 Ecuaciones por diferencias finitas.....	118
2.7.4 Etapa preliminar del modelo.....	123
2.7.5 Análisis de información recopilada.....	123
2.8 Hidrogeológicos .....	127
2.8.1 Parámetros Hidráulicos para el Modelado del Acuífero .....	127
2.8.2 Pruebas de Bombeo.....	127
2.8.3 Transmisividad .....	132
2.8.4 Conductividad Hidráulica (Permeabilidad) .....	134
2.8.5 Coeficiente de Almacenamiento .....	136
2.8.6 Niveles Estáticos .....	137
2.8.7 Evolución histórica de la extracción, producción y proyección de agua potable en Cd. Juárez Chihuahua. ....	140
2.9 Abatimientos de los niveles de agua subterránea.....	141
2.10 Dirección y Disposición del Flujo de Aguas Subterráneas .....	142
2.11 Etapa del diseño del modelo .....	154
2.12 Capas del Modelo .....	156
2.13 Acciones externas del modelo.....	157
2.14 Propiedades Hidráulicas.....	161
2.15 Condiciones iniciales .....	162
2.16 Condiciones de Borde.....	163
2.17 Condiciones de Frontera.....	165
2.18 Modelo Conceptual .....	166
2.19 Calibración y Verificación.....	167

2.19.1 Calibración del modelo matemático en régimen estacionario.....	167
2.20 Análisis de Sensibilidad .....	169
2.21 Predicción.....	171
2.21.1 Escenarios de explotación.....	172
2.21.2 Escenario 1 (Estabilidad).....	173
2.21.3 Escenario 2 (Variación de bombeo).....	173
2.21.4 Escenario 3 (Batería de pozos).....	175
2.22 Modelación del Acuífero Con Visual Modflow.....	177
<b>3 RESULTADOS</b> .....	179
3.1 Dirección de Flujo 1980-2014.....	179
3.2 Diseño del Modelo .....	187
3.3 Propiedades Hidráulicas.....	188
3.3.1 Conductividad Hidráulica .....	188
3.3.2 Almacenamiento específico.....	190
3.3.3 Condiciones iniciales .....	192
3.3.4 Recarga.....	193
3.4 Modelo Conceptual .....	195
3.5 Calibración y Verificación.....	195
3.6 Planteamiento de Escenarios de explotación .....	204
3.7 Simulación de Escenarios de Explotación.....	204
3.7.1. Escenario 1 .....	205
3.7.2 Escenario 2.....	210
3.7.2 Escenario 3.....	221
<b>4 DISCUSIÓN</b> .....	227
<b>5 CONCLUSIONES</b> .....	236
<b>6 BIBLIOGRAFIA</b> .....	241

## Lista de Figuras

Figura 1 Localización del Acuífero Valle de Juárez (Conagua, 2008).....	6
Figura 2 Provincias Fisiográficas .....	7
Figura 3 Secciones Geológicas del Acuífero Valle de Juárez (CONAGUA, 2008).....	14
Figura 4 Perfil de las secciones Geológicas A-A' y B-B' del Acuífero Valle de Juárez.....	15
Figura 5 Perfil de las secciones Geológicas C-C' y D-D'; del Acuífero Valle de Juárez.....	16
Figura 6 Sección longitudinal de Resistividad D-D' (GeoFimex, 1970).....	17
Figura 7 Sección Trasversal Geoeléctrica. (GeoFimex, 1970).....	18
Figura 8 Sección longitudinal de Resistividad B-B' (GeoFimex, 1970).....	19
Figura 9 Sección Trasversal Geoeléctrica B-B'' (G7 a G13). (GeoFimex, 1970).....	20
Figura 10 Perfiles Geoeléctricos del Acuífero Valle de Juárez. (CONAGUA, 2008).....	21
Figura 11 Punto de entrega del agua del río Bravo/Grande, a México. (Plan Maestro, 2000).....	26
Figura 12 Fuentes Alternas para abastecimiento de potable para Ciudad. Juárez. (COCEF, 2014).....	30
Figura 13 Acuíferos Bolsón del Hueco y Conejos Médanos (Creel et al., 2002). .....	31
Figura 14 Distribución de aprovechamientos según su estado de uso en Acuífero Valle de Juárez.....	32
Figura 15 Volúmenes Extraídos de 1926-2015 en Ciudad Juárez Chihuahua (Lemus, 2015). .....	35
Figura 16 Volumen acumulado 1926-2016 Ciudad Juárez Chihuahua (Lemus, 2015). .....	35
Figura 17 Extracciones anuales por municipio.....	37
Figura 18 Evolución de la Población Mundial (Vallin, 1993).....	41
Figura 19 Población Mundial 1900-2025 (Vallin, 1993) . .....	42
Figura 20 Habitantes en México durante el periodo de 1900-2015 (INEGI, 2015). .....	45
Figura 21 Proyección de la población en México 2010-2050 (CONAPO, 2015) .....	46
Figura 22 Población histórica del Estado de Chihuahua 1921-2015 (INEGI, 2015).....	47
Figura 23 Proyección de la población del Estado de Chihuahua 2010-2030 (CONAPO, 2015).....	48
Figura 24 Tasa de Crecimiento de Población Histórica (INEGI, 2015). .....	51
Figura 25 Población Histórica de ciudad Juárez chihuahua 1900-2015 (INEGI, 2015).....	51
Figura 26 Proyección de población de Ciudad Juárez 2010-2030 (CONAPO, 2015).....	52
Figura 27 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década de 1950. ....	56
Figura 28 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década de 1960. ....	57
Figura 29 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década de 1970. ....	58
Figura 30 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década de 1980. ....	59
Figura 31 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década de 1990. ....	60
Figura 32 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década del 2000. ....	61
Figura 33 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la mitad de la década del 2000. ....	62
Figura 34 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década del 2010. ....	63
Figura 35 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua 2015. ....	64
Figura 36 Proyección de la demanda y ofertas, fuentes actuales (JMAS, 2010). ....	90
Figura 37 Comparativa de Proyecciones de Población 2015-2030. ....	96
Figura 38 Comparación de proyecciones de población .....	98
Figura 39 Escenario de población 2015 (IMIP, 2016).....	103
Figura 40 Escenario de población 2020 (IMIP, 2016).....	107
Figura 41 Escenario de población 2030 (IMIP, 2016).....	111
Figura 42 Discretización hipotética de un sistema acuífero .....	117
Figura 43 Sistema de bloque centrado.....	118
Figura 44 Índice para las seis celdas adyacentes alrededor de la celda. (Modificado de McDonal and Harbaugh, 1988).....	119
Figura 45 Flujo en la celda i, j, k a partir de la celda i, j- 1, k. (Modificado de McDonald and Harbaugh, 1988).....	121
Figura 46 Localización de los pozos con prueba de bombeo .....	128
Figura 47 Interpretación de las pruebas de bombeo por los métodos Cooper-Jacob,.....	130

Figura 48 Volúmenes extraídos de 1926-2015 y proyectados 2016-2030.....	141
Figura 49 Líneas de flujo en el predesarrollo de Ciudad Juárez-El Paso (Hibbs, 1988). .....	143
Figura 50 Vecindad de IDW del punto seleccionado (Esri, 2017). .....	144
Figura 51 Cálculo de la diferencia cuadrada entre las ubicaciones asociadas (Esri, 2017) . .....	147
Figura 52 Capas en corte trasversal del área de estudio .....	156
Figura 53 Topografía de superficie y capas del acuífero para el modelo matemático.....	157
Figura 54 Base de datos de información de pozos en formato Visual Modflow .....	161
Figura 55 Ubicación de la batería pozos de extracción que se incluyen al modelo matemático del acuífero para simular el escenario de explotación 3.....	177
Figura 56 Diagrama del proceso de modelación .....	178
Figura 57 Dirección de flujo 1980 IDW Ciudad Juárez Chihuahua .....	180
Figura 58 Dirección de Flujo 1980 Kriging Ciudad Juárez Chihuahua.....	181
Figura 59 Dirección de Flujo 1990 IDW Ciudad Juárez Chihuahua. ....	182
Figura 60 Dirección de Flujo 1990 Kriging Ciudad Juárez Chihuahua.....	183
Figura 61 Dirección de Flujo 2014 Kriging Ciudad Juárez Chihuahua.....	184
Figura 62 Cambio de dirección del flujo en zona de transición Ciudad Juárez Chihuahua.....	185
Figura 63 Definición de la malla para el modelo.....	188
Figura 64 Distribución espacial de las 28 zonas que definen la conductividad hidráulica de entrada al modelo .....	189
Figura 65 distribución espacial del almacenamiento específico.....	191
Figura 66 Imagen interpolada de las curvas de igual elevación estática 2008.....	193
Figura 67 Distribución de la recarga en el modelo.....	194
Figura 68 Conceptual del Acuífero Valle de Juárez (Parte Norte) .....	195
Figura 69 Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados, 2008 .....	199
Figura 70 Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados, 2014. ....	202
Figura 71 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 1) .....	208
Figura 72 Depresión de las líneas equipotenciales de elevación del nivel estático .....	209
Figura 73 Dirección del flujo hacia las zonas de Abatimiento del año 2014.....	209
Figura 74 Dirección del flujo hacia las zonas de Abatimiento del año 2030.....	209
Figura 75 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2018.....	211
Figura 76 Cortes trasversales de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2018.....	212
Figura 77 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2022.....	213
Figura 78 Cortes trasversales de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2022.....	213
Figura 79 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2026.....	214
Figura 80 Cortes trasversales de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2026.....	215
Figura 81 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2030.....	216
Figura 82 Cortes trasversales de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2030.....	216
Figura 83 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 2) .....	220
Figura 84 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 3) .....	224
Figura 85 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2014-2018 (Esc 3).....	225
Figura 86 Comparación de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2018-2030 (Esc 3).....	226
Figura 87 Cortes trasversales de curvas de igual elevación estática y dirección de flujo 2018-2030.....	227

## Lista de Tablas

Tabla 1 Zonificación Georresistiva (Conagua 2008).....	22
Tabla 2 Balance geohidrológico del acuífero somero, Laguna de Patos, en unidades de m <sup>3</sup> /día. ....	28
Tabla 3 Volúmenes extraídos de 1926-2015. (Lemus, 2015).....	34
Tabla 4 Extracciones anuales por municipio. ....	36
Tabla 5 Evolución de la Población Mundial (en millones de habitantes) (Vallin, 1993). ....	41
Tabla 6 Población Mundial 1900-2025 (en millones de habitantes) (Vallin, 1993).....	42
Tabla 7 Tasa de Crecimiento de la Población Histórica de Ciudad Juárez Chihuahua ....	50
Tabla 8 Estudios previos del Acuífero Bolsón del Hueco (Valle de Juárez) (CONAGUA 2008).....	66
Tabla 9 Tasas de Crecimiento Medio Anual .....	95
Tabla 10 Resultados de la proyección de población 2015-2030.....	95
Tabla 11 Comparación de Proyecciones incluyendo a CONAPO .....	97
Tabla 12 Crecimiento histórico de 1950 al 2015 (IMIP, 2016) .....	101
Tabla 13 Baldíos seleccionados por superficie (IMIP 2016).....	105
Tabla 14 Baldíos seleccionados superficie, densidad (IMIP 2016) .....	106
Tabla 15 Baldíos seleccionados para el escenario 2030 (IMIP 2016) .....	109
Tabla 16 Resultados de población y vivienda 2030 (IMIP 2016) .....	110
Tabla 17 Reporte de prueba de bombeo .....	129
Tabla 18 Pruebas de bombeo recopiladas.....	131
Tabla 19 Resultados de interpretación de pruebas de bombeo .....	132
Tabla 20 Información de niveles Piezométricos de los años 2008 y 2014 .....	138
Tabla 21 Volúmenes Proyectados del 2015-2030 .....	140
Tabla 22 Nivel Estático para el año 1980 (73 pozos) .....	148
Tabla 23 Nivel Estático para el año 1990 (65 pozos) .....	149
Tabla 24 Nivel Estático para el año 2014 (176 pozos) .....	150
Tabla 25 Bombeo de pozos de extracción del área de estudio .....	159
Tabla 26 Base de datos con la de curvas de igual elevación de nivel estático.....	163
Tabla 27 Niveles piezométricos del área de estudio .....	164
Tabla 28 Incremento de bombeo 2014-2030.....	174
Tabla 29 Ubicación y características de la nueva batería de pozos .....	176
Tabla 30 Valores y rangos de colores de las 28 zonas de resistividad.....	190
Tabla 31 Valores y rangos de colores coeficiente de almacenamiento específico y capacidad o rendimiento específico.....	192
Tabla 32 Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados 2008.....	196
Tabla 33 Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados, 2014.....	199
Tabla 34 Comparativo entre los años de ajuste y aceptación del modelo de simulación. ....	203
Tabla 35 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 1).....	205
Tabla 36 Incremento de población y bombeo para el escenario 2 (2014-2030).....	211
Tabla 37 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 2).....	217
Tabla 38 Abatimiento promedio del Acuífero Valle de Juárez para el año 2030 (Escenario 3).....	222



## **1. INTRODUCCIÓN**

Hoy en día los estudios sobre el agua subterránea en zonas urbanas se están realizando en parte, por la interacción entre la disponibilidad del recurso y su vinculación con el crecimiento urbano de las ciudades. En los últimos años se ha visto cómo la problemática ligada a las aguas subterráneas es muy similar en las grandes urbes del mundo. La rápida y en algunos casos acelerada urbanización en el mundo afecta la disponibilidad del agua, así como su calidad, lo cual tiene importantes implicaciones sociales, ambientales, económicas y políticas. Por este motivo, los investigadores y en algunos casos gestores municipales abordan los mismos problemas, aunque muchas veces de forma independiente o no integrada en un esquema de trabajo conjunto, lo que supone un error claro de planteamiento. (Vázquez-Suñé et al., 2005).

Actualmente en el planeta el agua ocupa el 70% de la superficie terrestre, la mayor parte de esta agua se encuentra en los mares y océanos y es salada, por lo que es un elemento inutilizable para consumo humano, la agricultura y la mayor parte de las actividades humanas. El 97.5% del agua en la tierra es salada y únicamente el restante 2.5% es agua dulce. Del total de agua dulce en el mundo, el 69% se encuentra en los polos y en las cumbres de las montañas más altas y se encuentra en estado sólido. El 30% del agua dulce del mundo, se encuentra en la humedad del suelo y en los acuíferos profundos, y solo el 1% del agua dulce escurre por las cuencas hidrográficas en forma de arroyos, ríos, lagos, lagunas y en otros cuerpos superficiales de agua y en acuíferos (Perevochtchikova, 2004). Por lo cual, sin incluir a los glaciares, el agua subterránea es la fuente abastecedora más grande del planeta y se trata de un recurso relativamente limpio, confiable y rentable (Shiklomanov, 2000).

En México el abastecimiento de la población con agua subterránea representa más del 62%, la mayor parte del agua que se extrae en el país se destina a las actividades agropecuarias, cerca del 76.3% se utiliza para el riego de 6.5 millones de hectáreas (cerca de la cuarta parte de la superficie sembrada), así como para las actividades pecuarias y acuícolas, le sigue el uso para abastecimiento público con 14.6% del volumen total de agua extraída, la energía eléctrica 4.8% y la industrial con 4.3% (CONAGUA, 2015).

En el Estado de Chihuahua el problema de la sobreexplotación de acuíferos se agudiza principalmente en zonas áridas, zonas con alto crecimiento demográfico y en áreas donde se extrae agua subterránea para irrigación intensiva de cultivos. El estado de Chihuahua está sometido a uno o más de estos factores de presión, además de otros factores climatológicos eventuales como son la sequía y el aumento de temperatura ambiente por el calentamiento global. Los acuíferos de Chihuahua se han degradado en cantidad y calidad durante los últimos años, operando con déficits de hasta -197% como el Acuífero Cuauhtémoc. En 2016, el acuífero Cuauhtémoc era el más sobreexplotado en el país. El acuífero Valle de Juárez es otro de los acuíferos que están considerados como sobreexplotados en el Estado de Chihuahua. Según reportes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en el que se dan a conocer los resultados los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas de los acuíferos del Estado de Chihuahua (CONAGUA, 2015).

En el norte del Estado de Chihuahua se localiza Ciudad Juárez Chihuahua considerada como una de las ciudades más importantes del país, esta ciudad tradicionalmente ha sido un centro industrial para la zona norte del estado y un centro turístico para los habitantes del país vecino, actualmente convertido en uno de los principales núcleos del país debido principalmente a la industria maquiladora.

Adicionalmente a estas actividades se desarrolla también en forma importante la actividad agrícola, para la que se ha establecido el Distrito de Riego 009, dedicado principalmente al cultivo de algodón para exportación. El fenómeno de emigración del campo a las ciudades es común en todo el país, presentándose en la entidad por diversos factores tales como el clima, la falta de servicios la escasa infraestructura y la violencia entre otras.

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta la población, es la deficiencia de agua potable, tanto en cantidad como en su calidad, ya que el acuífero presenta fuertes abatimientos y una continua migración de agua de mala calidad hacia los pozos de agua potable, a causa de la sobreexplotación que se hace del acuífero en la zona urbana.

Hay varios estudios e investigaciones sobre los recursos hídricos que permiten ver la evolución de este elemento desde diversos panoramas. Algunos autores centran sus estudios en las aguas superficiales y prestan poca atención al estudio del agua subterránea. Como Ordoñez (2001) y Maderey (2005), que nos dicen que es necesario tener un conocimiento básico del ciclo hidrológico que determina el estado actual del recurso hídrico, así como la presión por la demanda de este, teniendo en cuenta su distribución espacial y temporal, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección, y que sirva de base a los usuarios del recurso y planificadores, a fin de considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros. Salas-Plata (2006) expone que la única fuente renovable de agua en la región Paso del Norte es el Río Bravo, y de la que destina el 93% de esta agua para la agricultura en México y EU. El 2.8% del caudal del río (2.6 mil millones de metros cúbicos) se asigna a México, en conformidad con un tratado firmado en 1906. Esta agua se desvía en Ciudad Juárez y se combina con aguas tratadas para irrigar cultivos en las zonas aledañas a la ciudad.

## **1.1 Acuífero Valle de Juárez**

El acuífero Valle de Juárez se encuentra ubicado al norte del Estado de Chihuahua, en el extremo noroeste de la Región Hidrológica No. 24 Río Bravo. El acuífero tiene una superficie de 3,413.82 kilómetros cuadrados, comprende totalmente al municipio de Praxedis G. Guerrero, y parcialmente a los municipios de Juárez, Guadalupe y Ahumada del Estado de Chihuahua. Los municipios referidos tienen el siguiente porcentaje de la superficie del acuífero, Guadalupe el 65.51 por ciento; Juárez el 23.08 por ciento; Praxedis G. Guerrero el 10.67 por ciento y Ahumada el 0.74 por ciento.

Este acuífero abastece a una de las regiones más importantes, tanto por la población como por sus actividades económicas que dependen principalmente del agua subterránea. (CONAGUA, 2008).

En la parte central y sur del acuífero el uso del agua subterránea es casi exclusivamente para uso agrícola, salvo algunos pozos que existen en las poblaciones para uso potable; sin embargo, a pesar de la gran cantidad de pozos agrícolas que existen, muchos no operan, la influencia del río Bravo así como los excedentes del riego que se hace con la mezcla de aguas residuales provenientes de Ciudad Juárez y las del tratado internacional que se conduce por la acequia madre, ha dado como resultado que los niveles freáticos del acuífero asciendan provocando problemas de niveles someros y de drenaje en la tercera unidad del distrito de riego, por lo que se ha tenido que construir un sistema de drenes a fin de abatir los niveles en esa zona del acuífero regional y resolver el problema de niveles freáticos someros (CONAGUA, 2008).

Durante las últimas décadas el establecimiento de cultivos en el valle de Juárez ha presentado algunas variantes, registrándose la mayor superficie sembrada en 1989 con 20,875 has. Y la

menor en 1992 con 13,862 has. La reducción de superficie establecida fue debido principalmente a la baja producción en el cultivo del algodón, ocasionando que los rendimientos promedio bajaran de 4 a 1.4 pacas por hectárea, y por consiguiente la descapitalización por el incremento de adeudos de los productores por falta de capacidad de pago. A partir de 1993 la superficie de cultivo se ha incrementado paulatinamente como consecuencia del surgimiento de programas de apoyo a los productores agrícolas como lo son El Procampo y Alianza para el Campo, alcanzándose a sembrar 19,067 has. en 1998, año en el que el algodono representó a nivel local el 54% de la superficie establecida con un rendimiento promedio de 4.2 pacas por ha. (2.67 tons/ha.). Finalmente, en el año 2016 se sembraron 10,272 has. En los últimos 15 años el promedio de hectáreas sembradas fue de 10,790 has. Reflejando el ocaso en que se encuentra el distrito de Riego 009 por la falta de apoyo hacia el campo y la violencia extendida en la región.

La diversificación de cultivos en el valle de Juárez se encuentra restringida por la salinidad de los suelos y la calidad del agua para riego, figurando como los más importantes el algodono, alfalfa, sorgo forrajero, trigo, avena forrajera, pradera, nogal y en incipiente introducción y desarrollo el pistache.

## **1.2 Descripción del Área de Estudio**

El acuífero llamado administrativamente Valle de Juárez por la Comisión Nacional del Agua es la parte mexicana del acuífero binacional Bolsón del Hueco tiene su localización en la frontera norte del Estado de Chihuahua, colindando con el país vecino de los Estados Unidos de América, observándose como frontera natural el cauce del Río Bravo. Su geometría es irregular, con una superficie alargada de aproximadamente 3386.45 km<sup>2</sup> de extensión, de los aproximadamente 10800 km<sup>2</sup> del total del acuífero, que se encuentra contenida dentro de los

paralelos 31°07' y 31°48' de latitud norte así como entre los meridianos 106°10' y 106°58' de longitud oeste; altitud entre 1 000 y 1 900 m. Incluye totalmente el Distrito de Riego 009, del Valle de Juárez, la zona urbana de Ciudad Juárez y la zona de Anapra como se muestra en la figura 1.

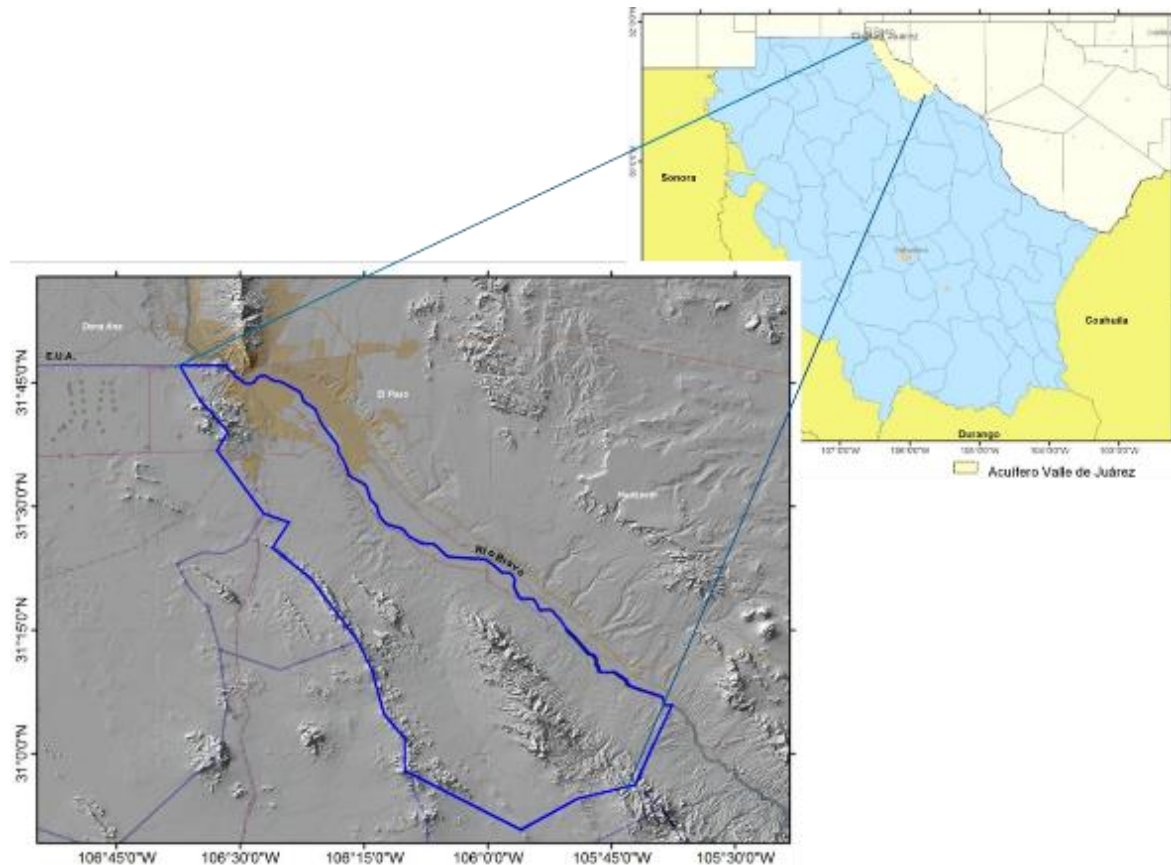


Figura 1 Localización del Acuífero Valle de Juárez (Conagua, 2008)

El área de estudio se encuentra comunicada al sur del estado y la República Mexicana a través de una de las vías de comunicación más importantes de país que es la carretera Panamericana, además se encuentra comunicada por la carretera federal 02, la cual parte de Ciudad Juárez hacia el sureste hasta Porvenir donde termina, y al oeste comunica con las poblaciones de Ascensión y Janos y continúa hasta Sonora.

Además de estos accesos a Ciudad Juárez se puede trasladar hacia los Estados Unidos de Norteamérica por tres puentes internacionales ubicados, uno en la zona centro de la ciudad

(Santa Fe), otro en la zona del Chamizal (Córdoba), uno más cerca del poblado Zaragoza (Waterfill) y un último en el poblado Guadalupe-Tornillo.

### 1.2.1 Fisiografía

De acuerdo a la clasificación de Provincias Fisiográficas realizada por E. Raisz (1964), la zona se localiza en la porción centro occidental de la Provincia Cuencas y Sierras, la cual está limitada al oriente por la Sierra Madre Oriental, al sur por las Sierras Transversales y al occidente por la Sierra Madre Occidental. Figura 2.



Figura 2 Provincias Fisiográficas

### 1.2.2 Provincia Fisiográfica

La provincia fisiográfica de cuencas y sierras se caracteriza por ser una extensa zona desértica en la que emergen grandes bloques montañosos, constituidos principalmente de rocas sedimentarias marinas de edad cretácica separados por amplias llanuras que, al paso del

tiempo, durante el Paleógeno y Cuaternario, han sido rellenadas por depósitos aluviales, fluviales y lacustres conformado las cuencas endorreicas conocidas en el norte del país como “bolsones” típicos de esta provincia. Estas regiones se caracterizan por su escasa pendiente y por presentar, en la mayoría de los casos, una laguna en su porción central, que en la mayoría de los casos son temporales (CONAGUA, 2008).

### **1.2.3 Geomorfología**

De acuerdo con sus formas adoptadas durante los procesos del intemperismo y a los agentes atmosféricos y erosión de las rocas, se diferenciaron cuatro unidades geomorfológicas: Sierras Plegadas, Lomeríos, Planicie Ondulada y Planicie Aluvial.

#### **1.2.3.1 Sierras Plegadas**

Conjunto de sierras formadas por rocas sedimentarias del Cretácico que presentan fuertes pendientes con una forma alargada, escarpada y delgadas, entre las cuales se desarrollaron largos valles angostos siguiendo una línea estructural marcado por éstas y por su fallamiento, con un alineamiento Noroeste-Sureste. Tiene elevaciones que van hasta 1800 msnm, la Sierra de Juárez es representativa de este tipo de formaciones rocosas.

#### **1.2.3.2 Lomeríos**

Los lomeríos se asocian principalmente a depósitos de pie de monte (abanicos aluviales) y en menor manera con un área de arenas eólicas en la porción central del área de estudio. Los lomeríos se localizan principalmente en la parte poniente de Ciudad Juárez, y en la parte oriental de la Sierra de Juárez. Las elevaciones en esta unidad oscilan entre 1120 msnm y 1300 msnm (CONAGUA, 2008).

### **1.2.3.3 Planicie Ondulada**

El relieve está formado y constituido por arenas finas que dan forma a un conjunto de dunas fijas, clasificadas por la intensa actividad eólica que ha actuado sobre las rocas preexistentes dándole al relieve una forma ondulada.

### **1.2.3.4 Planicie Aluvial**

La planicie aluvial es topográficamente la parte más baja del valle con pendientes muy suaves, formadas por los depósitos aluviales y fluviales que conforman la ribera del Río Bravo, consistente en gravas, arenas, limos y arcillas. Es una franja angosta en ambos lados del Río Bravo de entre 9 y 11.5 km de ancho, con un promedio de 9.5 km. Con base en las características geomorfológicas que presenta la zona de estudio son: su alto grado de intemperismo y erosión, su relieve generalmente suave presentando extensas áreas planas o semiplanas con meandros abandonados o paleocanales, excepto en las sierras donde se han excavado profundos cañones y un patrón de drenaje controlado principalmente por el fracturamiento, la pendiente, la litología y permeabilidad de los materiales por los que atraviesa; se le puede ubicar en una etapa de madurez (CONAGUA, 2008).

### **1.2.4 Clima**

De acuerdo a la clasificación de climas realizada por Köeppen y modificada por Enriqueta García (1964) para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la región es muy seco y/o desértico y se clasifica por su humedad y temperatura como BWkx'(e'), que es un clima templado con veranos cálidos. Respecto a la temperatura de acuerdo con la información de las mismas estaciones, prácticamente el área de estudio se encuentra entre los 17 y 18°C las cuales aumentan su valor hacia el noroeste y sureste es decir hacia Ciudad Juárez Chih. Según registros de estaciones climatológicas de Ciudad Juárez, las temperaturas medias en

la zona son de 18.2 grados Centígrados, teniendo como mínima promedio 7.5 y máxima promedio 28.4, en los meses de enero y julio respectivamente. Las precipitaciones promedio anuales son de 265.3 mm, los cuales se acumulan en su mayor parte los meses de Julio a Septiembre, cuando es la temporada alta de precipitaciones. Con respecto a la evaporación potencial media anual, los registros con los que se cuentan no son tan amplios, ya que datan de 1999 a la fecha, con un promedio anual de 2218.12 mm (CONAGUA, 2008).

### **1.2.5 Hidrografía**

De acuerdo con la clasificación de Regiones Hidrológicas de la Comisión Nacional del Agua, la zona se encuentra en la Región Hidrológica RH 24 “Río Bravo”, subregión hidrológica Río Conchos, dentro de la cuenca Río Bravo-Ciudad Juárez. Esta región hidrológica tiene como principal corriente precisamente el Río Bravo, del cual toma su nombre. Se trata de una corriente de régimen perene que fluye de noroeste a sureste, limitando el área en su porción norte; así mismo, desde Ciudad Juárez Chih., hasta su desembocadura en el Golfo de México, en la ciudad de Matamoros, Tamaulipas que es frontera internacional entre México y Estados Unidos de América (CONAGUA, 2008).

### **1.2.6 Geología**

En el área de estudio la geología está formada principalmente por rocas clásticas y carbonatadas del Cretácico. Los sedimentos del relleno de la cuenca por lo regular son materiales heterogéneos débilmente consolidados y no consolidados que sobreyacen rocas desde el Precámbrico hasta el Terciario. Que van desde la Sierra de Juárez, Sierra El Presidio, hasta la Sierra de Guadalupe en el norte de Chihuahua, México. (Sandeem, 1954); (De la O’Carreno, 1957, 1958); (GeoFimex, 1970); (Wilkins, 1986).

El relleno de la parte superior de la cuenca está compuesto principalmente por depósitos fluviales y depósitos de la planicie de inundación. Los depósitos de relleno, de la parte baja

de la cuenca en el Bolsón del Hueco incluyen arcillas lacustres, intercaladas con capas de lutitas bentonitas y limolitas, así como algunos lentes discontinuos de arena. Estos depósitos y otros anteriores se encuentran yuxtapuestos con fanglomerados que circundan la margen de la cuenca (Strain, 1966).

Los sedimentos de arenas y gravas que constituyen la parte alta del relleno de la cuenca tienen mayor espesor a lo largo de las montañas Franklin y Organ y de la Sierra de Juárez, adelgazándose y adquiriendo una textura más fina a lo largo del eje de la cuenca (USBR, 1973). Los depósitos en los rellenos de la parte alta de la cuenca están compuestos predominantemente de gravas y arenas intercaladas con arcillas, cenizas volcánicas y caliche (GeoFimex, 1970); (Wilkins, 1986). A través de toda la cuenca, el porcentaje de arcillas generalmente se incrementa con la profundidad (GeoFimex, 1970); (Orr y Risser, 1992).

Al sudeste del puerto de El Paso, entre las sierras de Juárez y Franklin, el Rio Bravo fluye a través de una extensa planicie de inundación aluvial que ha provocado una incisión en la superficie del Bolsón del Hueco. En las proximidades de Ciudad Juárez/El Paso, el “Valle de Juárez/El Paso” es de aproximadamente 9.7 a 13 kilómetros de ancho con una profundidad de un poco más de 60 metros (USBR, 1973).

El valle se extiende aproximadamente 145 kilómetros hacia el este, al sudeste de Indian Hot Springs en donde una vez más se restringe en un estrecho entre la Sierra de la Cieneguilla y las Montañas Quitman. El valle aumenta su profundidad en dirección sudeste y tiene una profundidad de casi 100 metros en las proximidades a Fabens, 48 kilómetros aguas abajo del Estrecho de El Paso. La pared del valle es atravesada frecuentemente por arroyos que cortan al Bolsón del Hueco y a las superficies de la planicie de inundación. El análisis se extiende hasta unos cuantos kilómetros aguas abajo de Fort Quitman, en donde la planicie de inundación del Rio Bravo se torna muy angosta (Hibbs, 1998).

El aluvi3n Cuaternario y las terrazas fueron formados por la deposici3n de sedimentos acarreados por el Rio Bravo. La planicie de inundaci3n aluvial del Rio Bravo en el Valle de Ju3rez/El Paso se encuentra subyacida por un mosaico complejo de dep3sitos fluviales ondulantes y trezados, formados durante los periodos alternantes de socavaci3n y deposici3n a finales del periodo Cuaternario. Estos dep3sitos fluviales consisten en estratos irregularmente distribuidos de gravas, arenas y arcillas, as3 como de lentes y capas de limos (De la O'Carreno, 1957-1958); (USBR, 1973); (Alvarez y Buckner, 1980).

El relleno aluvial consiste en material proveniente de la erosi3n del bols3n, del basamento y de sedimentos localizados fuera de la cuenca, transportados por el Rio Bravo desde su nacimiento en Colorado y Nuevo M3xico hasta el Valle de Ju3rez y El Paso. Se ha registrado un espesor total promedio del aluvi3n del Rio Bravo de aproximadamente 64 metros en Estados Unidos. El espesor promedio es de aproximadamente 52 metros en M3xico. El espesor del aluvi3n saturado es, en promedio, de 57 y 45 metros respectivamente en las porciones mexicana y americana de la planicie de inundaci3n aluvial, Valle de Ju3rez/El Paso (CILA, 1989).

Los dep3sitos e3licos de limos y arenas cubren el aluvi3n del Rio Bravo en varios sitios. En donde se presentan dunas y otro tipo de dep3sitos e3licos, estos por lo regular limitan los m3rgenes exteriores de la planicie de inundaci3n del Rio Bravo. La mayor3a de las dunas tienen un espesor menor a los 4.5 metros (CILA, 1989). Los dep3sitos e3licos constituyen superficies de infiltraci3n y recarga debido a que se encuentran bien clasificados y con escasa vegetaci3n.

La geolog3a regional abarca unidades litol3gicas principalmente de origen sedimentario y en menor proporci3n volc3nico, cuyo rango estratigr3fico abarca del Mesozoico hasta el Cenozoico, comprendidas dentro del terreno tectonoestratigr3fico del estado de Chihuahua.

Las rocas más antiguas son de tipo sedimentario de origen marino y corresponden a las formaciones Navarrete-Las Vigas, Cuchillo y Grupo Aurora, las cuales fueron depositadas en la Cuenca Chihuahua, durante el Cretácico Inferior y están representadas por lutitas-areniscas, calizas arcillosas y biógenas y calizas, respectivamente. Cubren discordantemente esta secuencia derrames riolíticos y riolíticos, así como depósitos piroclásticos de composición ácida, asociados al emplazamiento de dos cuerpos intrusivos de composición granítica y granodiorítica, pertenecientes todos al Oligoceno. El Mioceno está representado por derrames basálticos, los cuales sobreyacen discordantemente las secuencias anteriores. Finalmente, la secuencia es cubierta de manera discordante por depósitos semiconsolidados y no consolidados pertenecientes al periodo Neógeno Superior-Cuaternario, constituidos por conglomerados polimícticos, limos y arenas, depósitos lacustres y eólicos (CONAGUA, 2008).

Dentro del área de estudio existen muchos pozos con corte litológico, sin embargo, la mayoría de ellos se restringen a profundidades que no sobrepasan los 300 m., y sólo algunos de ellos llegan hasta los 500 m. sin tocar el basamento. De acuerdo con un pozo perforado en la porción estadounidense del bolsón, el espesor máximo de estos depósitos es de 2743 m (Meyer, 1976).

La Comisión Nacional del Agua realizó en el año 2008 una serie de estudios geológicos en el Acuífero Valle de Juárez donde se describen algunas secciones geológicas, como se puede observar en la figura 3. En la sección geológica A-A', el medio granular gana espesor de manera abrupta debido a la falla normal localizada en el flanco este de la Sierra de Juárez. Esta sección la vemos en la figura 4 donde se puede observar que el agua subterránea se aloja principalmente en los depósitos terciarios de bolsón que, aunque presenta algunos estratos arcillosos, está constituido principalmente por material arenoso con algunas capas delgadas

de arcilla. Esta sección muestra la parte del acuífero que está siendo aprovechada por los pozos que abastecen de agua potable a Ciudad Juárez Chihuahua. La mayor parte de los pozos de uso agrícola se emplazan solo en los depósitos del aluvión y raramente rebasan los 100 m. de profundidad, mientras que los pozos que abastecen de agua potable a Ciudad Juárez extraen agua principalmente de los depósitos de Bolsón y tienen profundidades promedio de 250 m. Los sedimentos del Aluvión Río Bravo tienen espesores que varían de 40 a 100 m. y se compone de materiales con granulometría que va de gravas a arcillas y arenas; dispuestos en estratos irregulares de espesores variables, cuya litología cambia gradualmente tanto lateral como verticalmente, existiendo una predominancia de las gravas y arenas (CONAGUA, 2008).

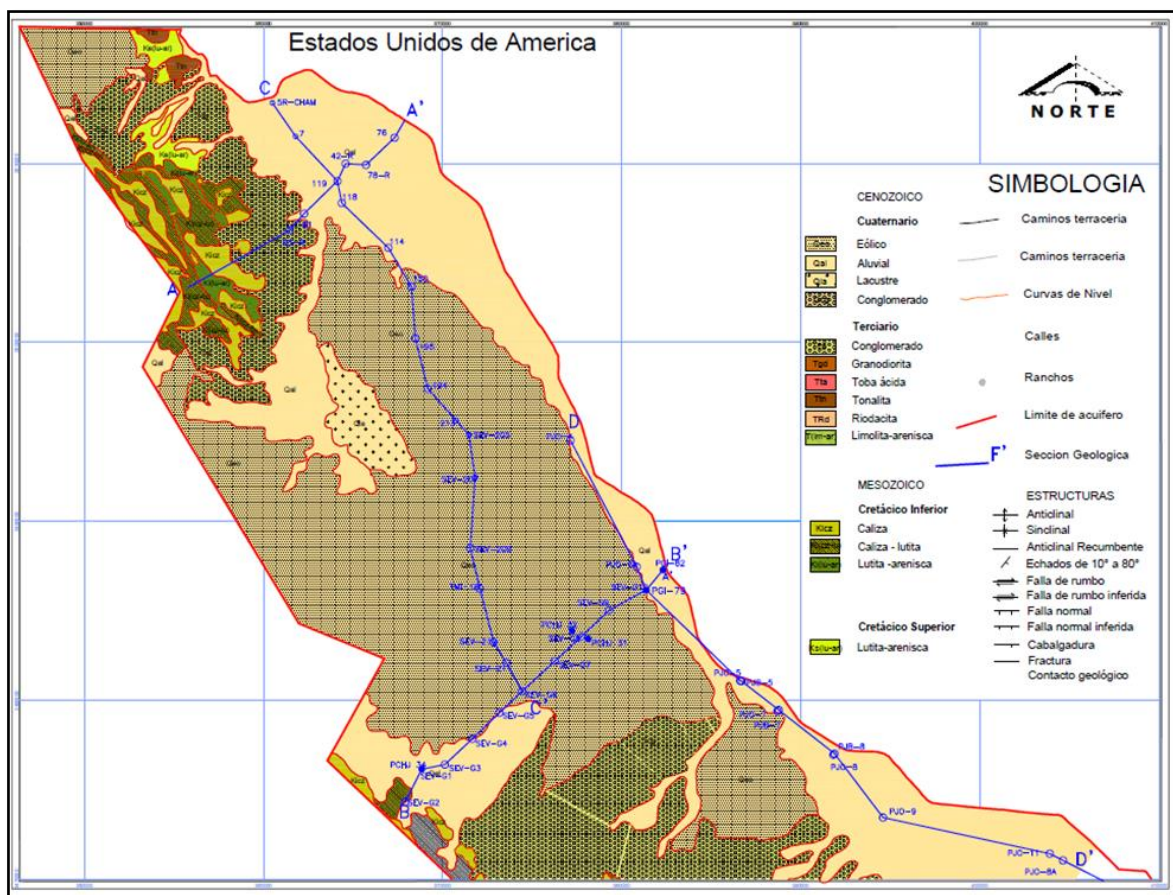


Figura 3 Secciones Geológicas del Acuífero Valle de Juárez (CONAGUA, 2008).

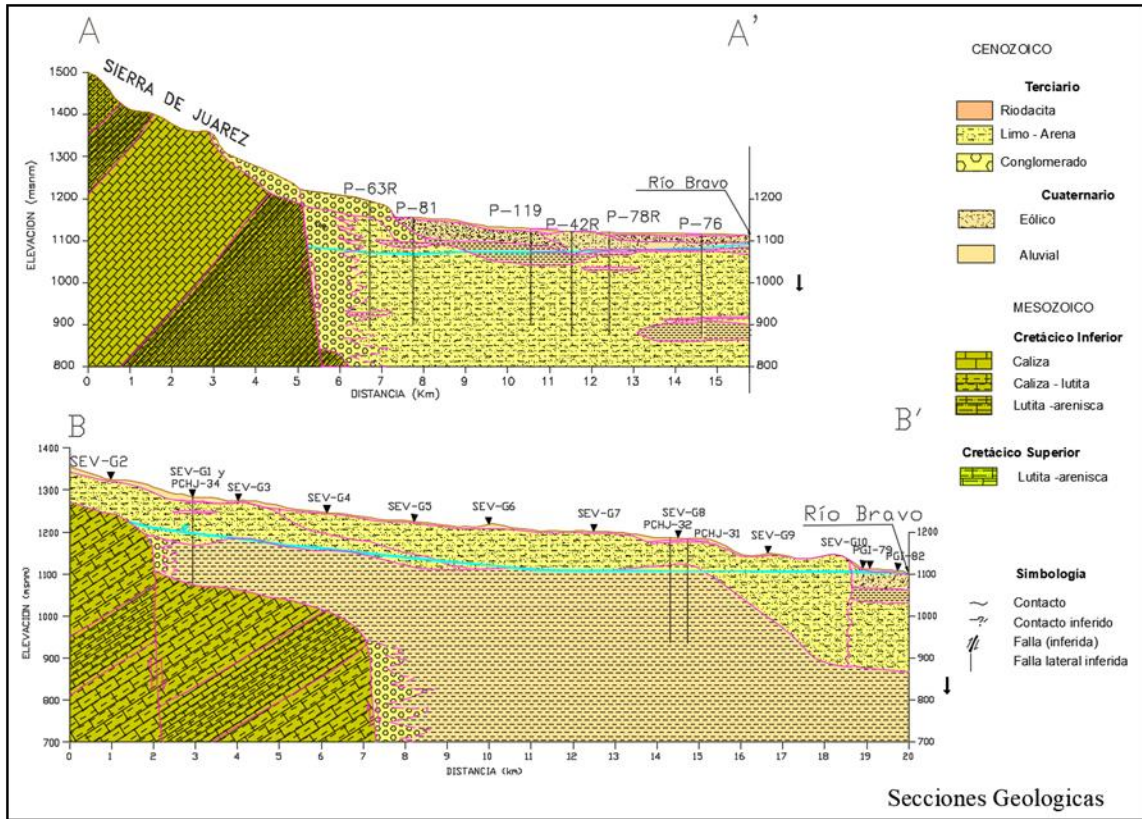


Figura 4 Perfil de las secciones Geológicas A-A' y B-B' del Acuífero Valle de Juárez.  
(CONAGUA, 2008).

Los depósitos de Bolsón, de acuerdo con la información proporcionada por pozos ubicados a lo largo del valle, varían lateralmente en su granulometría, predominando las arenas, limos y arcillas.

En la sección geológica D-D' que vemos en la figura 5 que se extiende por el valle agrícola y va desde el poblado de Loma Blanca al sureste de Ciudad Juárez Chihuahua hasta el poblado de Guadalupe. En ella se puede observar un estrato arenoso a una profundidad aproximada de 450 m., este estrato es más permeable que los depósitos areno-arcilloso que lo circundan, y aparentemente se extiende hacia zonas de recarga con más elevación, lo cual provoca algún tipo de artesianismo que incluso llega a brotar en el poblado de El Millón, el

cual se abastece de agua potable a través del pozo PJB-5 que alcanza a emplazarse en el mencionado estrato (CONAGUA, 2008).

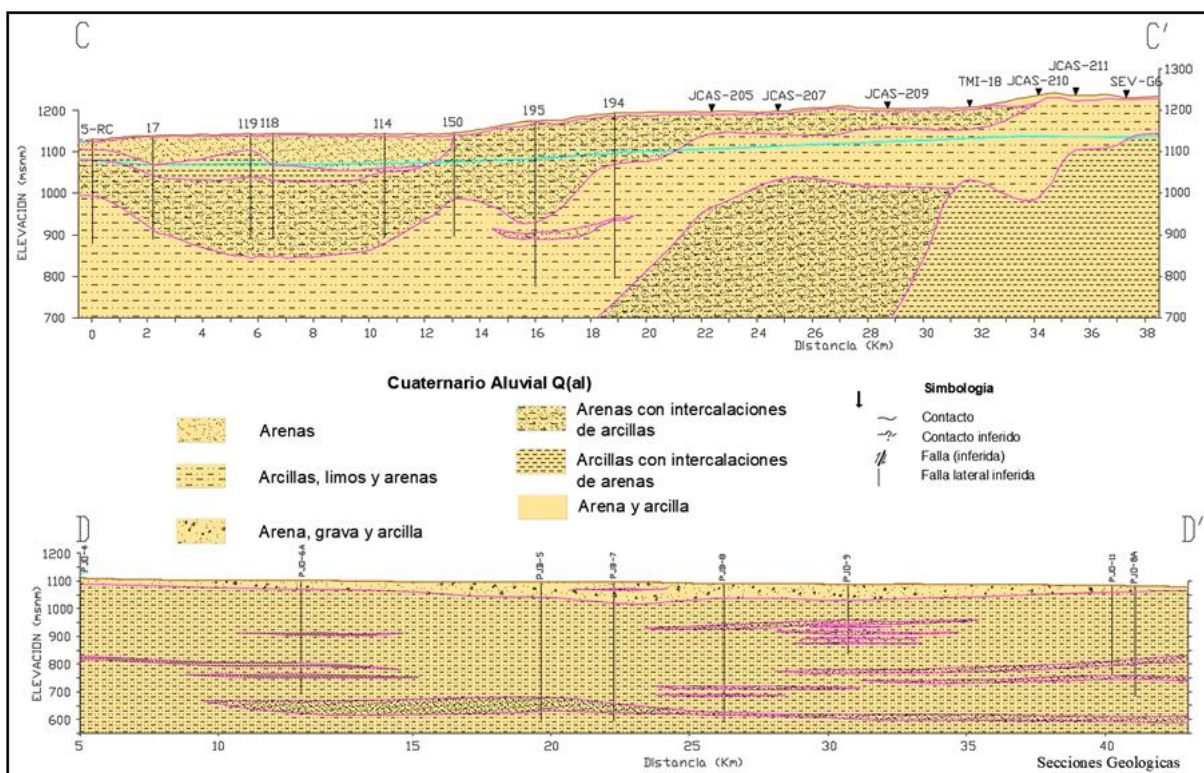


Figura 5 Perfil de las secciones Geológicas C-C' y D-D'; del Acuífero Valle de Juárez. (CONAGUA, 2008).

Existe una tendencia a aumentar el contenido de arcilla desde el valle agrícola hacia la zona de las Sierras de Presidio, Guadalupe y San Ignacio, lo cual se refleja en la disminución de gastos de extracción de los pozos perforados en esas zonas, aunque la calidad del agua, por el contrario, tiende a mejorar sustancialmente hacia esas zonas. En la sección geológica C-C' que vemos en la figura 5 que va desde el centro de Ciudad Juárez Chihuahua hasta cerca de la Sierra El Presidio, se puede observar esta tendencia a aumentar el contenido de arcilla en el subsuelo (CONAGUA, 2008).

Anteriormente en el año de 1998, se efectuaron estudios de resistividad en una sección longitudinal D-D' mostrando las mismas tendencias geológicas de estudios anteriores, figura

6. Se llevaron a cabo sondeos eléctricos verticales (GI a GVI), desde la parte central de Ciudad Juárez Chihuahua hasta Práxedes G. Guerrero, cubriendo gran parte del Acuífero Valle de Juárez (Bolsón del Hueco), en el que mostraron que las resistividades del acuífero llegan hasta los 100 ohm-m en los 50 a 200 metros de la parte superior del relleno del bolsón figura 7. (Hibbs, 1998).

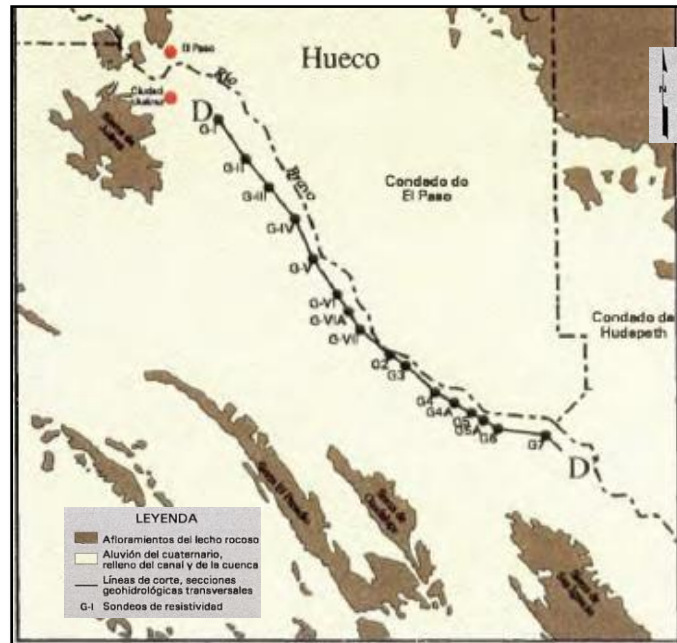


Figura 6 Sección longitudinal de Resistividad D-D' (GeoFimex, 1970).

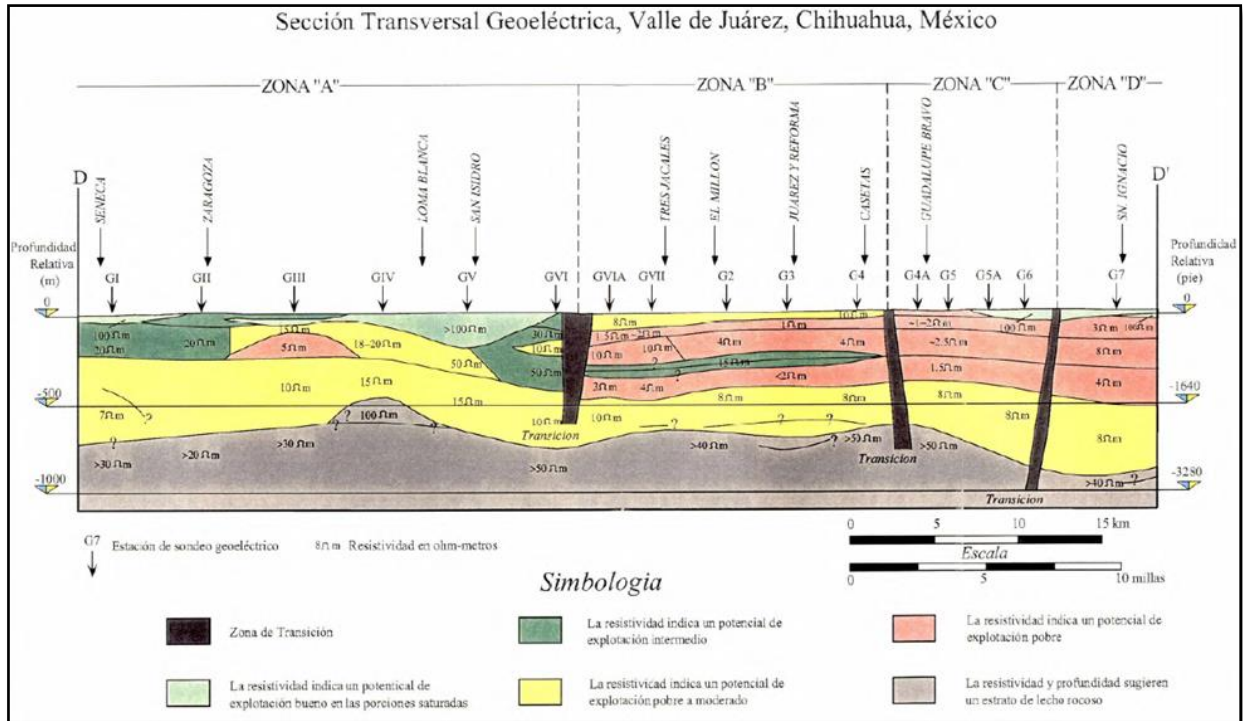


Figura 7 Sección Trasversal Geoelectrónica. (GeoFimex, 1970).

Los altos valores en la resistividad sugieren la presencia de agua dulce en sedimentos con texturas relativamente gruesas. A profundidades entre los 250 y 500 metros, los valores de resistividad eléctrica son generalmente menores a los 15 ohm-m, estos valores bajos implican estratos con contenidos predominantes de arcillas, o estratos saturados con fluidos ligera a moderadamente salinos (De la O'Carreno, 1958); (Dobrin, 1976); (Kearey y Brooks, 1984). A profundidades de entre 600 a 750 metros los valores de resistividad son mayores de 20 a 50 ohm-m, sugiriendo un basamento probablemente de la Era Cretácica. Al sudeste de GVI, (GVI a G6), la resistividad eléctrica dentro de los primeros 200 metros de la parte superior del relleno del bolsón, es en su mayoría menor a los 8 ohm-m, marcando la transición de depósitos de bolsón con predominio de arena saturada conteniendo agua dulce, a depósitos de bolsón con predominios de arcilla o depósitos de cuenca saturados con aguas subterráneas de calidad inferior (Figura 7). Se presenta una excepción entre G5A y D' donde se encuentra

una capa gruesa de 50 metros de espesor de material altamente resistivo 100 ohm-m. Esta capa probablemente represente rellenos de bolsón de textura gruesa que pueden estar relacionados con depósitos fluviales formados a lo largo del Valle del Arroyo Bandejas (GeoFimex, 1970).

En la sección geoelectrica longitudinal B-B' al sur este del acuífero, figura 8. Los sondeos eléctricos verticales llevados a cabo paralelamente al Rio Bravo mostraron que las resistencias del acuífero alcanzan valores hasta de 100 ohm-m. solo en los primeros 50 metros del relleno del bolsón, los cuales son en su mayoría materiales sin saturar dentro de la región sur de la planicie de inundación del Rio Bravo.

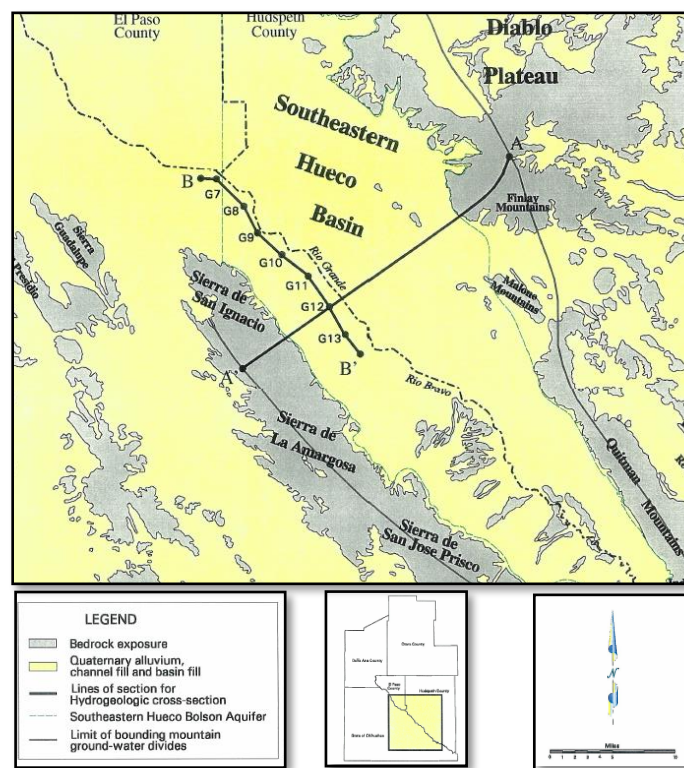


Figura 8 Sección longitudinal de Resistividad B-B' (GeoFimex, 1970).

A profundidades entre los 100 y 500 metros, los valores de resistencia eléctrica son por lo regular menores a los 5 ohm-m. Estos valores bajos implican estratos dominados por arcillas, o estratos saturados con fluidos de salinidad ligera a moderada (De la O'Carreno, 1958;



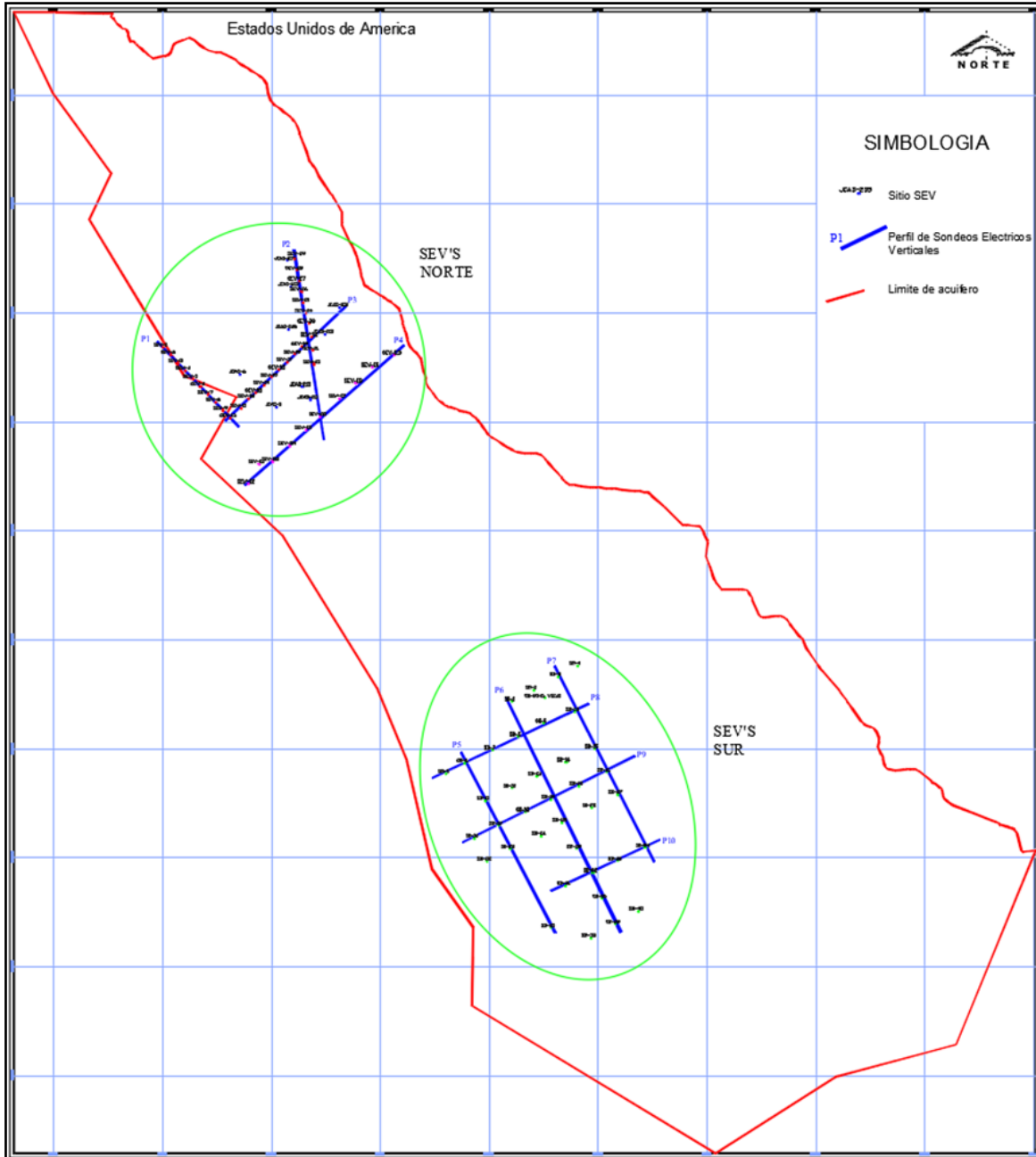


Figura 10 Perfiles Geoeléctricos del Acuífero Valle de Juárez. (CONAGUA, 2008).

La distribución de las resistividades se agrupa en la tabla 1. Para la zona de estudio, se definieron 6 unidades geoelectricas, que se describen en la siguiente tabla y se analizan más adelante.

Tabla 1 Zonificación Georresistiva (Conagua, 2008).

UNIDAD GEOELECTRICA	INTERVALO RESISTIVO [ohm-m]	POSIBLE LITOLOGÍA	CORRELACION GEOLÓGICA
<b>a</b>	Muy variable	Material aluvial y eólico, presentan saturación parcial	Depósitos sedimentarios continentales del Cuaternario.
<b>b</b>	70 a 250	Depósito sedimentario de materiales gruesos con algo de compactación y con baja o nula saturación	Depósitos sedimentarios del Cuaternario y Terciario
<b>c</b>	35 a 70	Materiales granulares consolidados y conglomerados con cementación, se consideran materiales de baja permeabilidad y saturación	Conglomerado
<b>d</b>	10 a 36	Depósito de bolsón de buena permeabilidad.	Sedimentos de edad Terciaria
<b>e</b>	Menor de 10	Depósito areno limoso con intercalaciones de estratos de limos y arcillas	Rocas del Terciario y del Cretácico
<b>f</b>	Mayor de 1,000	Caliza lutita	Rocas del Cretácico

El perfil 1 tiene una orientación noroeste sureste, se localiza en el Valle de Juárez, hacia el sureste de la zona urbana de Ciudad Juárez, cuenta con 10 sondeos eléctricos verticales que alcanzaron una profundidad de investigación del orden de 300 m., se puede apreciar que en el perfil predomina a partir de una profundidad de aproximadamente 50 m., la unidad (d), de buena permeabilidad que corresponde a los depósitos de bolsón, constituido por sedimentos de granulometría fina como la arena fina.

El perfil 2 al igual que el anterior, es longitudinal al valle con una orientación noroeste sureste, aunque más próximo al cauce del río Bravo; se integra este perfil con un total de 11 sondeos eléctricos verticales y se puede apreciar que a profundidad predominan las unidades (c) y (d), aunque es posible también apreciar la presencia de la unidad (f) que corresponde al basamento.

El perfil 3 es transversal al valle y tiene una orientación suroeste noreste, se integra con un total de 12 sondeos eléctricos verticales, y es notoria la presencia en la mayor parte del perfil de la unidad (d) que corresponde al material de buena permeabilidad, que se ha identificado como los depósitos de bolsón, que es interceptado por los pozos de buena productividad localizados en el valle, La unidad (e) de baja resistividad tiene un menor desarrollo.

El perfil 4 también es transversal al valle y se localiza al igual que los anteriores en la porción norte del valle, predominan a profundidad las unidades (d) y (e) que corresponden a los sedimentos de granulometría media a fina, y probablemente los de la unidad (e) contengan agua salobre o de relativa alta salinidad.

El perfil 5 al igual que los restantes se ubica en la porción sur del Valle de Juárez, en el valle comprendido entre las sierras de San Ignacio, La Amargosa y las Sierras de Guadalupe y Presidio, que también es conocido como Valle de Bandejas. El perfil, tiene una orientación noroeste sureste y se integra con 5 sondeos eléctricos verticales, es posible apreciar en el perfil la predominancia a profundidad de las unidades (d) y (e), apreciándose en la porción sureste la presencia a profundidad de la unidad (f) que se ha asociado con las rocas calcáreas de edad cretácica que constituyen el basamento en este valle.

El perfil 6 con 9 sondeos eléctricos verticales se emplaza en forma longitudinal al valle de Bandejas con una orientación noroeste sureste, es notoria en el perfil la presencia a profundidad de la unidad de baja resistividad y en la porción noroeste la unidad de alta resistividad asociada con el basamento representado por las calizas y lutitas.

El perfil 7 próximo a la Sierra de la Amargosa, y en la mayor parte del perfil se detecta la unidad de alta resistividad asociada a la roca caliza y lutita que forma en cuerpo de la sierra mencionada, hacia la porción sureste del perfil se desarrolla la unidad (d) de buena permeabilidad.

El perfil 8 al igual que los dos siguientes es perpendicular al valle de Bandejas. Se detecta en los extremos el basamento y en el centro predominan las unidades (c) y (e), teniendo la unidad (d) una expresión reducida.

Al igual que en el perfil anterior, el perfil 9 se detectan en los extremos a profundidad la roca calcárea que constituye el basamento y que da cuerpo a las sierras próximas, en el centro del perfil predominan las unidades (d) y (e) que identifica al material que rellena la depresión que forma el valle.

Por último se integra el perfil 10 con un total 4 sondeos eléctricos verticales, predomina a profundidad en la porción noroeste la unidad de alta resistividad que forma el basamento y en el resto del perfil es posible observar el desarrollo de las unidades (c), (d) y (e) (CONAGUA, 2008).

Es por la vasta información de los cortes litológicos de los pozos y de registros eléctricos realizados en la región, que permiten definir que el acuífero regional está constituido, en su parte superior, por materiales clásticos conformados por abanicos aluviales, sedimentos eólicos y aluviales depositados en el bolsón. Subyaciendo a esta unidad, se presenta un medio fracturado constituido por rocas sedimentarias kársticas e ígneas extrusivas que en superficie funcionan como rocas transmisoras, permitiendo la infiltración a través de fallas y fracturas hacia las unidades topográficamente más bajas. Ambas unidades están separadas en la llanura aluvial por una capa arcillosa de espesor variable que ocasiona artesianismo (CONAGUA, 2008).

### **1.3 Recursos Hídricos Existentes.**

En la Región Paso del Norte nuestra área de estudio se cuenta con dos tipos de recursos hidráulicos existentes; superficiales y subterráneos. Como parte de los superficiales se tienen escurrimientos perennes e intermitentes. En cuanto a los recursos subterráneos, hay dos

clases, el acuífero somero y acuífero profundo. El acuífero somero (Aluvión Río Grande) conocido como Laguna de Patos su principal recarga es el Río Bravo y los terrenos aledaños al mismo, es de agua salada y no apta para consumo humano, sus niveles piezométricos son variables y fluctúan en la zona urbana de Ciudad Juárez entre 7 y 60 m de profundidad (CNA, 2001).

La principal fuente de agua potable para el área urbana y de regadío para el Valle de Juárez la provee el acuífero profundo conocido como Valle de Juárez (Bolsón del Hueco), según la CNA sus niveles piezométricos están a mayor profundidad que el del acuífero somero y su calidad de agua es mejor, y puede ser utilizada para consumo humano previa cloración.

Esta agua en algunos pozos tiene concentraciones mayores a las permitidas por la NOM-127 SSA1-1994 en manganeso, por lo que la JMAS en la zona urbana ha optado por dejar de operarlos y substituirlos por nuevos pozos, previa autorización de CNA.

Hay algunos otros cuerpos de agua subterráneos cerca de la zona de estudio como los acuíferos de Samalayuca, Conejos Médanos y las minas de Bismark.

### **1.3.1 Agua Superficial**

Dentro de la zona que comprende el estudio existe sólo una corriente superficial perenne, el Río Bravo. Esta corriente aguas arriba de Ciudad Juárez, es controlada por las siguientes presas: El Elefante, ubicada en el estado de Nuevo México de EUA, aproximadamente a 125 millas (200 km) al norte de El Paso Texas; la presa El Caballo, ubicada también en Nuevo México, aproximadamente a 25 millas (40 km) aguas abajo de la primera, se encuentra la presa derivadora Americana, ubicada a 2 millas (3.2 km) al Noroeste, aguas arriba del punto donde el río pasa a ser frontera internacional con México; y la presa derivadora Internacional, ubicada a 3.4 km aguas abajo de la presa Americana, la cual deriva el agua hacia nuestro país, por medio de un canal, denominado Acequia Madre, para el riego del Distrito de Riego

009, localizado en la zona denominada Valle de Juárez, al sureste de la ciudad. La ubicación de la bocatoma donde se entrega el agua a nuestro país se encuentra ubicada geográficamente en las coordenadas latitud N31° 45' 36", longitud W106° 30' 32" con elevación de 1,141 msnm. Esta bocatoma consiste en un conjunto de compuertas que dan la entrada del agua a la Acequia Madre, esto lo podemos ver en la figura 11.

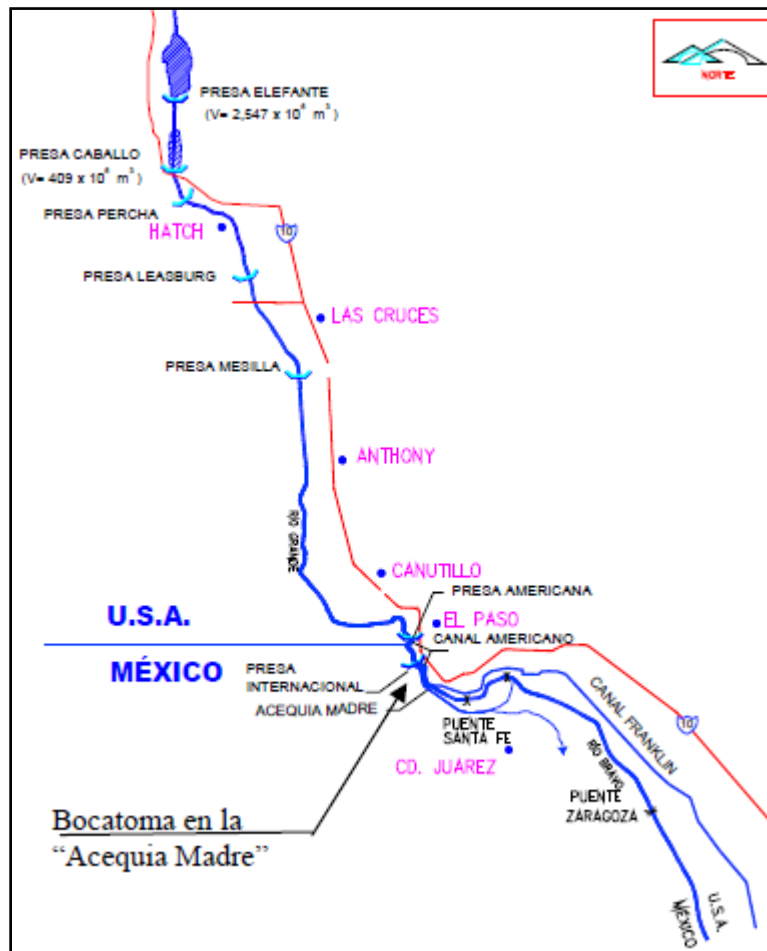


Figura 11 Punto de entrega del agua del río Bravo/Grande, a México (Plan Maestro, 2000).

El agua que se entrega a nuestro país está regulada por diversos acuerdos; sin embargo, el tratado original fue suscrito el 21 de mayo de 1906, en la ciudad de Washington, por el presidente de México, Porfirio Díaz y el gobierno de los EUA, firmándose como

“Convención para la Equitativa Distribución de las Aguas del Río Grande/Bravo”. En él se menciona que EUA entregará a México un total de 60,000 Acres-pies de agua (74’ 019,765.60 m<sup>3</sup>) anuales ( Ver Cuadro 3.2), repartidos en forma variable a través del año, con un máximo de 5.7 m<sup>3</sup>/s, en los meses de abril a junio y sin entregar en los meses de diciembre y enero; pero si existiera un caso de extraordinaria sequía o de algún grave accidente en el sistema de irrigación de EUA, el volumen comprendido se disminuirá en la misma proporción que la que se entregue a las tierras sujetas al sistema de irrigación en los EUA. Por su parte México renunció a las reclamaciones pasadas y futuras de los usuarios mexicanos del Valle de Juárez, por lo que el Río Bravo desde la Ciudad del Paso Texas hasta Ford Quitman no llevaría agua por lo que el río está prácticamente seco (COCEF, 2013).

Con respecto a otros escurrimientos, en la zona se encuentran algunas corrientes intermitentes, como son: los arroyos de, El Colorado, Los Indios, Las Víboras, Casa Grande, El Gordo, Las Bandejas, El Tapo y El Mimbre, los cuales no son de gran consideración para ser aprovechados como fuentes de abastecimiento, ya que los gastos que conducen son mínimos y sólo se presentan cuando caen lluvias en la región, que como ya se indicó son muy escasas.

También se localizan algunos cuerpos de agua de cierta importancia como son, la laguna Guzmán, la cual está localizada al suroeste de Ciudad Juárez a una distancia aproximada de 105 km, situada en latitud N 31° 17’ y longitud W107° 27’ y la laguna Santa María que al igual que la anterior, se encuentra ubicada al suroeste de Ciudad Juárez, a una distancia aproximada de 95 km con coordenadas de latitud N 31° 7’ y longitud W 107° 16’. Estos cuerpos de agua no representan ninguna alternativa viable, para el abastecimiento de la ciudad, por su lejanía y por la calidad del agua de estas, ya que son salobres y sus volúmenes de agua limitados.

### 1.3.2 Agua Subterránea

El acuífero Laguna de Patos (Acuífero Somero), subyacente al Bolsón del Hueco, se aloja en una extensa planicie de inundación aluvial, también conocida como Aluvión Río Grande, que en las proximidades del Valle de Juárez – El Paso; alcanza entre 9.7 y 13 km de ancho y una profundidad de poco más de 60 m (SBR, 1973).

El espesor saturado promedio es de 45 y 57 m, respectivamente, en las porciones estadounidense y mexicana de la planicie de inundación aluvial, lo que implica que tomando una profundidad promedio de 51 m, el volumen total de agua en el acuífero es de 6,431 Mm<sup>3</sup> aproximadamente (CILA et al., 1998).

El acuífero somero es de tipo libre y presenta niveles freáticos a muy poca profundidad, que varían desde decímetros en algunas zonas cercanas al río, hasta más de 10 m en las zonas alejadas del mismo. El balance geohidrológico del acuífero somero, Laguna de Patos, fue calculado por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez mediante un modelo matemático de simulación hidrodinámica (Moreno y Rascón, 1998). Obteniéndose los resultados que muestra la tabla 2.

Tabla 2 Balance geohidrológico del acuífero somero, Laguna de Patos, en unidades de m<sup>3</sup>/día (Moreno y Rascón, 1998).

<b>Fuente</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Pérdidas del almacenamiento</b>
Intercambio horizontal	633	14,681	
Transferencia hacia el acuífero profundo		135,617	
Pozos		43,174	
Recarga difusa	77,750	378	
Río Bravo	57,592		
<b>Total</b>	<b>135,975</b>	<b>193,850</b>	<b>57,875</b>

El acuífero Bolsón del Hueco es una de las dos únicas fuentes de abastecimiento que tiene actualmente Ciudad Juárez. Los estudios efectuados anteriormente, realizados por *Texas Water Comisión*, muestran que de los 49 mil millones de metros cúbicos (MMm<sup>3</sup>) de reserva que había en el Bolsón del Hueco en los años ochenta, estos se redujeron a 26 MMm<sup>3</sup> para el año 2001, con una de extracción de 0.270 MMm<sup>3</sup> por año. A este ritmo, el Bolsón tendrá para el año 2030 una reserva de tan sólo 5 MMm<sup>3</sup>.

El Programa Hidráulico de Gran Visión 2001-2025 de la Región VI, Río Bravo (CONAGUA, 2000), indica que el volumen de recarga en este acuífero es de 290 millones de m<sup>3</sup>/año, mientras que la extracción alcanza los 310 millones de m<sup>3</sup>/año, lo anterior hace patente la sobreexplotación que tiene este acuífero.

Hay algunos otros acuíferos cercanos que se podrían considerar como fuentes de abastecimiento de agua en un futuro, para Ciudad Juárez, estos son las Minas de Bismark, Plazuela de Acuña, Presidio-Sapelló, Candelaria y Bandejas, no se tienen estudios detallados que indiquen la capacidad de estas fuentes, aunque se conoce de manera aproximada el caudal que es factible aprovechar de cada acuífero, que es de 1,000 l/s respectivamente. Para conocer la capacidad de los acuíferos es indispensable que se realicen estudios para determinar su capacidad almacenada y el balance considerando el caudal extraído y la infiltración.

El acuífero de Conejos Médanos cuenta con una recarga anual de 50 millones de m<sup>3</sup> y se extrae en promedio un volumen de 1.58 millones de m<sup>3</sup>/año, esto indica que este acuífero aun cuenta con capacidad para su explotación, como lo vemos en la figura 12. Actualmente está en operación como fuente secundaria con una capacidad de 1000 l/s para Ciudad Juárez (COCEF, 2013).

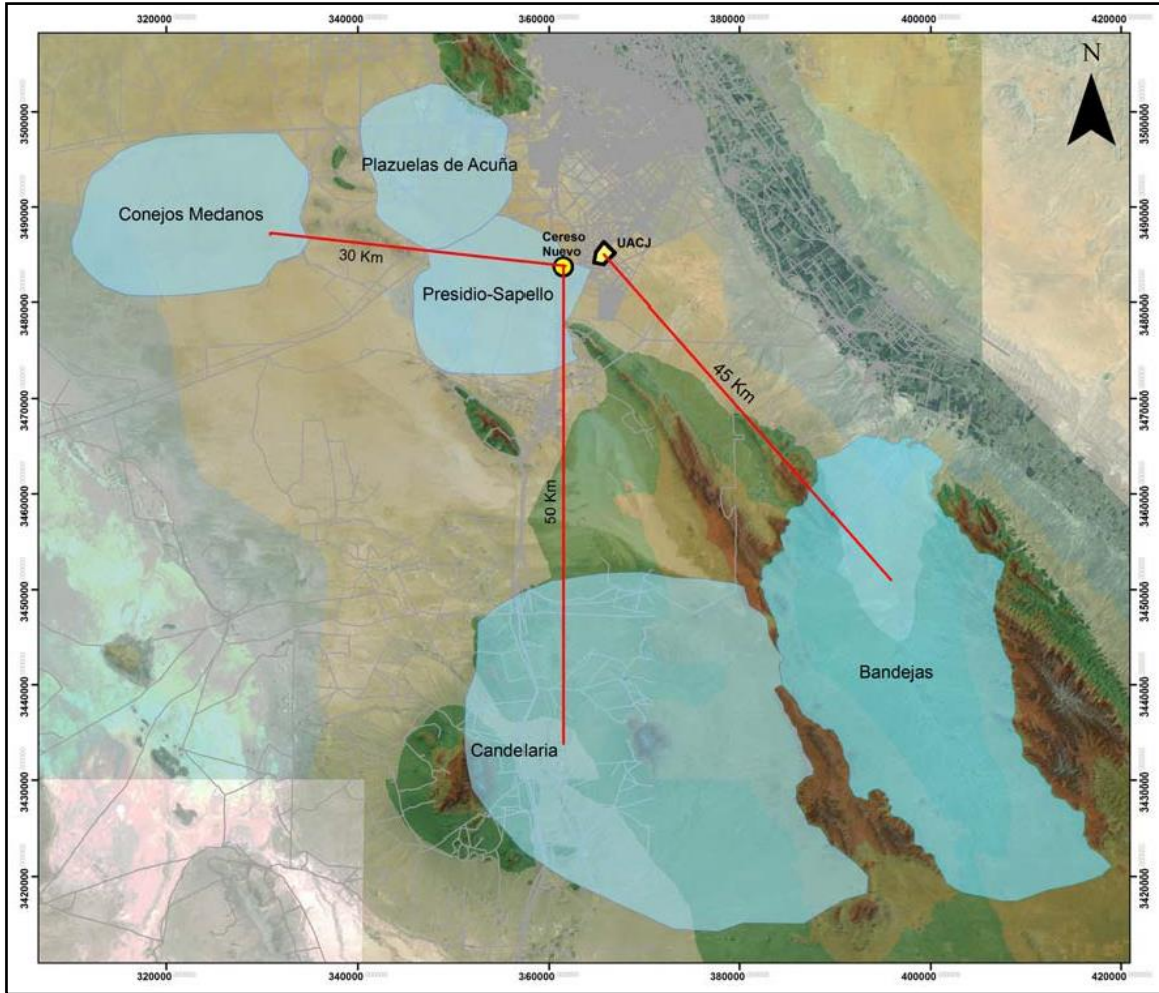


Figura 12 Fuentes Alternas para abastecimiento de potable para Ciudad Juárez (COCEF, 2014).

En la figura 12 se muestra un mapa con la posible fuente de abastecimiento, donde en un eventual desabasto o baja calidad de las fuentes actuales de explotación, serian una opción de abastecimiento, pero a un alto costo para la población por los costoso que sería la conducción del agua, afectando económicamente a la población que sería la que tendría que asumir los gastos.

Ciudad Juárez se abastece de agua de los acuíferos Bolsón del Huevo (Valle de Juárez) y de la Mesilla (Conejos-Médanos) por ser esta sus únicas opciones hasta el día de hoy de agua potable, en la figura 13 se pueden apreciar ambos acuíferos,

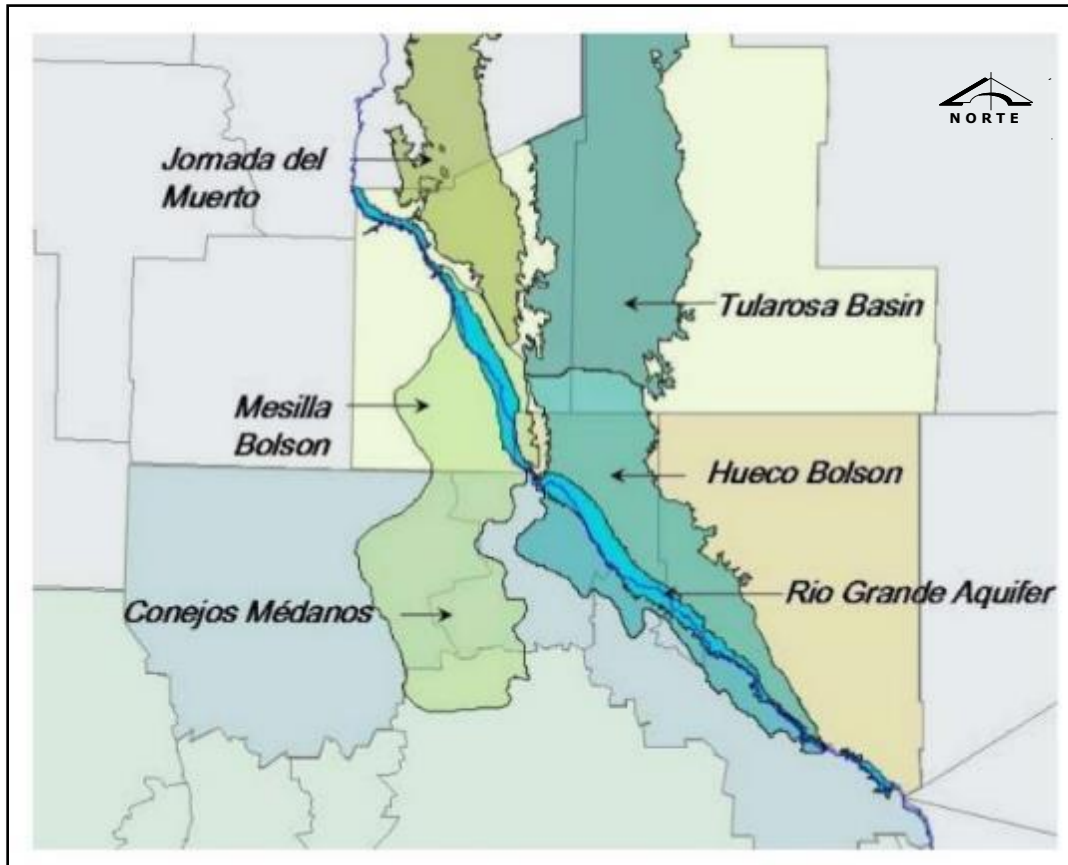


Figura 13 Acuíferos Bolsón del Hueco y Conejos Médanos (Creel et al., 2002).

#### 1.4 Volúmenes Extraídos

Ciudad Juárez y el Paso Texas están situadas justo encima del acuífero que abastece a ambas ciudades llamado Bolsón del Hueco, en la parte mexicana llamado Valle de Juárez del cual se han extraído 5,690,708,270 m<sup>3</sup> de agua de 1926-2015, solo de la parte urbana de Ciudad Juárez Chihuahua.

En el 2008 se realizó un censo de aprovechamientos para el Acuífero Valle de Juárez por la Comisión Nacional del Agua, donde se censaron un total de 640 aprovechamientos la gran mayoría pertenecen a la zona urbana de Ciudad Juárez Chihuahua, y los restantes del Distrito

de Riego 009. De los 640 aprovechamientos censados todos corresponden a pozos, no encontrándose manantiales o norias en la zona.

Como se observa en la figura 16, de la totalidad de pozos censados, un poco más de la mitad de ellas se encuentran en funcionamiento. De esta manera, se tienen como aprovechamientos en estado activo un total de 330. El resto se distribuye de la siguiente manera: en situación de abandono se tienen 228, como clausurados 5 pozos, como inactivos por distintos motivos hay 72 pozos y finalmente 5 de los pozos inventariados en años anteriores no se encontraron en el sitio. Por lo que se les nombro como no existentes, como se muestra de manera gráfica en la figura 14.

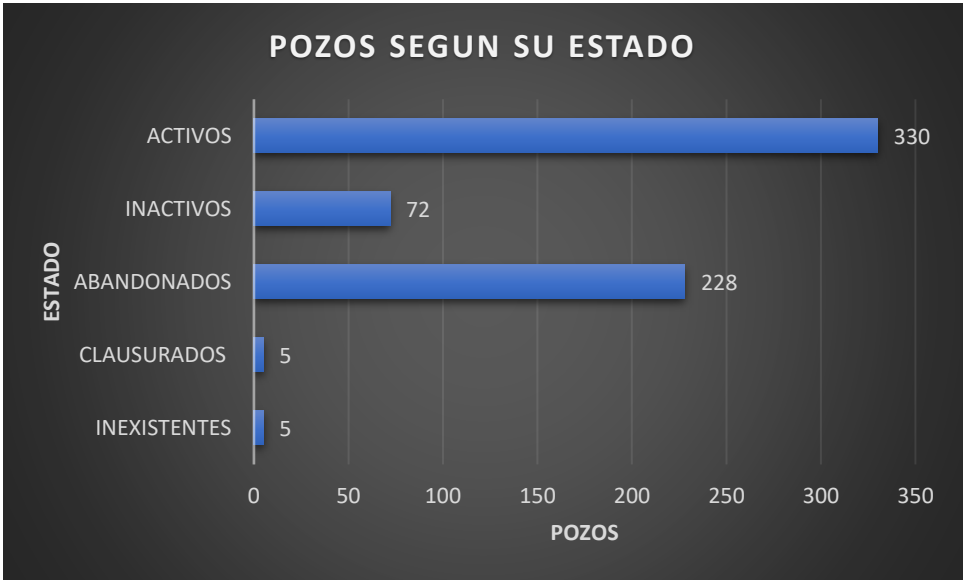


Figura 14 Distribución de aprovechamientos según su estado de uso en Acuífero Valle de Juárez (CONAGUA, 2008).

Por lo que respecta al uso que se les da a los pozos activos la mayoría, 198 son de uso potable, siguiendo el de uso agrícola con un total de 114, y de menor ocurrencia están los de uso doméstico–pecuario, con solamente 17 de ellos, y un solo pozo como uso recreativo. El

sistema extracción de Ciudad Juárez está integrado por 212 pozos distribuidos sobre el área urbana, incluyendo 23 pozos del acuífero de Conejos Médanos (Bolsón de Mesilla) al poniente de Ciudad Juárez Chihuahua.

Se le han extraído desde 1926 hasta el 2015, al Acuífero Valle de Juárez solo para el área urbana de Ciudad Juárez 5,690,708,270 m<sup>3</sup>, como lo vemos en la figura 15, ocasionando que el nivel estático de los pozos se haya abatido entre 60 m. en la parte baja de la ciudad y 70 m. en la parte alta, teniendo de base un monitoreo de 1962 hasta el 2012, mientras que el Acuífero Conejos Médanos tiene un abatimiento de 1.25 m. desde el 27 de mayo del 2010, que inicio su monitoreo, su extracción ha sido de 120,399,524 m<sup>3</sup>. a la Fecha (Lemus, 2015).

Los volúmenes extraídos presentan un comportamiento casi sin incremento de 1926 a 1940 debido principalmente a la baja población en esos años, a partir de 1960 el volumen extraído tiene un crecimiento exponencial principalmente por la alta tasa de crecimiento demográfico, hasta que decrece en el año 2008 por los problemas de inseguridad que sufrió la ciudad y que freno la tasa de crecimiento de población lo que repercute en el consumo de agua, aun así la extracción va en aumento, haciendo que el Acuífero Valle de Juárez se insustentable (Lemus 2015). Solo durante el Año 2015, se extrajo un volumen de 163,928,369 m<sup>3</sup>, del Acuífero Valle de Juárez y 20,530,225 m<sup>3</sup>, del Bolsón de la Mesilla. La demanda máxima de verano ocurrida en julio del 2015 fue de 5,800 m<sup>3</sup>/seg. y un gasto medio de 5.190 m<sup>3</sup>/seg.

Debido a la desaparición de las acequias de riego, y el intercambio de las tierras de riego a zonas urbanas, el Rio Bravo ha disminuido su gasto y únicamente circula la cuota del tratado de 1906, lo que disminuye las recargas naturales al acuífero, del que se abastece Ciudad

Juárez (Lemus, 2015). En la tabla 3 se aprecian el historial de los volúmenes extraídos solo en la cabecera municipal de Ciudad Juárez de 1926 al 2015.

Tabla 3 Volúmenes extraídos de 1926-2015 (Lemus, 2015).

AÑO	VOLUMEN EXTRAIDO (m <sup>3</sup> )	AÑO	VOLUMEN EXTRAIDO (m <sup>3</sup> )	AÑO	VOLUMEN EXTRAIDO (m <sup>3</sup> )
1926	1,315,655	1958	18,186,891	1990	119,831,026
1927	3,204,252	1959	20,666,675	1991	120,599,434
1928	3,031,789	1960	20,505,605	1992	127,102,205
1929	2,843,512	1961	21,564,841	1993	130,385,971
1930	2,663,137	1962	20,969,888	1994	135,111,495
1931	2,482,767	1963	18,929,879	1995	143,150,000
1932	2,308,702	1964	20,918,525	1996	141,098,172
1933	2,122,022	1965	20,747,814	1997	139,246,143
1934	3,222,875	1966	20,728,159	1998	145,450,081
1935	3,969,708	1967	22,307,745	1999	149,992,637
1936	3,969,810	1968	24,308,110	2000	155,631,024
1937	3,993,277	1969	27,319,505	2001	153,858,239
1938	3,985,068	1970	29,581,505	2002	153,785,901
1939	3,929,738	1971	36,350,754	2003	154,362,733
1940	4,112,614	1972	39,975,278	2004	147,073,100
1941	4,481,440	1973	43,951,851	2005	150,873,600
1942	4,912,654	1974	45,996,380	2006	156,226,220
1943	5,464,158	1975	48,751,773	2007	159,357,774
1944	5,891,735	1976	51,937,270	2008	163,916,188
1945	5,541,380	1977	55,633,845	2009	161,259,356
1946	5,217,573	1978	60,649,515	2010	161,654,083
1947	4,865,277	1979	66,037,523	2011	171,462,758
1948	6,882,568	1980	68,829,945	2012	169,139,748
1949	7,069,861	1981	72,415,237	2013	173,728,896
1950	7,359,467	1982	77,048,179	2014	177,468,891
1951	7,019,036	1983	81,244,707	2015	184,501,318
1952	11,351,105	1984	82,413,205	2016	111,012,482
1953	11,351,609	1985	83,926,592		ENERO A JULIO
1954	11,363,690	1986	88,990,026		
1955	16,507,301	1987	97,388,161		
1956	17,700,931	1988	104,938,813		
1957	17,441,231	1989	115,337,654		

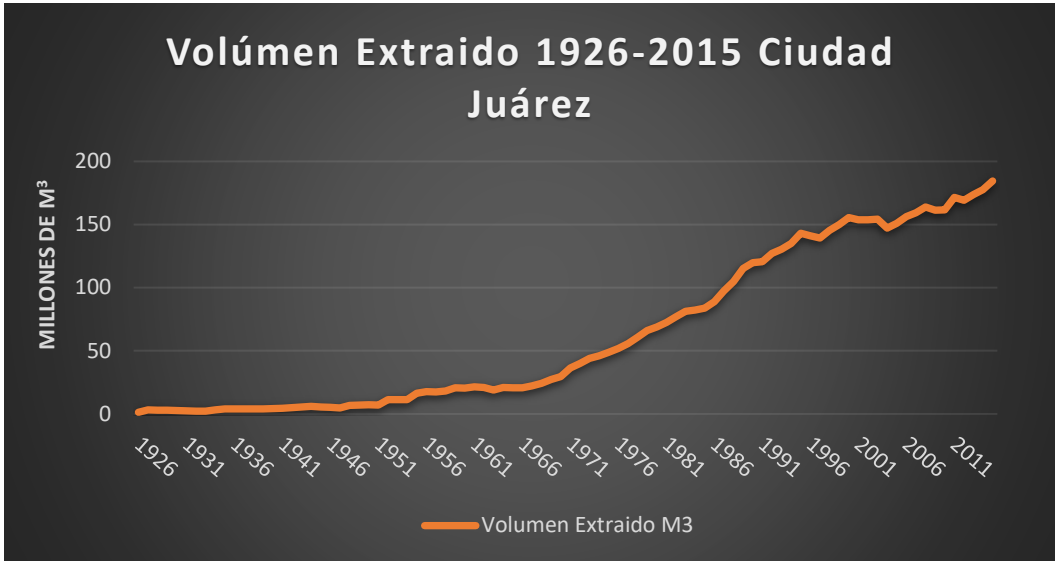


Figura 15 Volúmenes Extraídos de 1926-2015 en Ciudad Juárez Chihuahua (Lemus, 2015).

En la figura 15 se observa una tendencia muy parecida a la gráfica histórica de población con algunos altibajos en la época de violencia de la ciudad. De igual forma en la figura 16 vemos el volumen acumulado desde 1926 a 2015 siguiendo una curva ascendente como se muestra a continuación

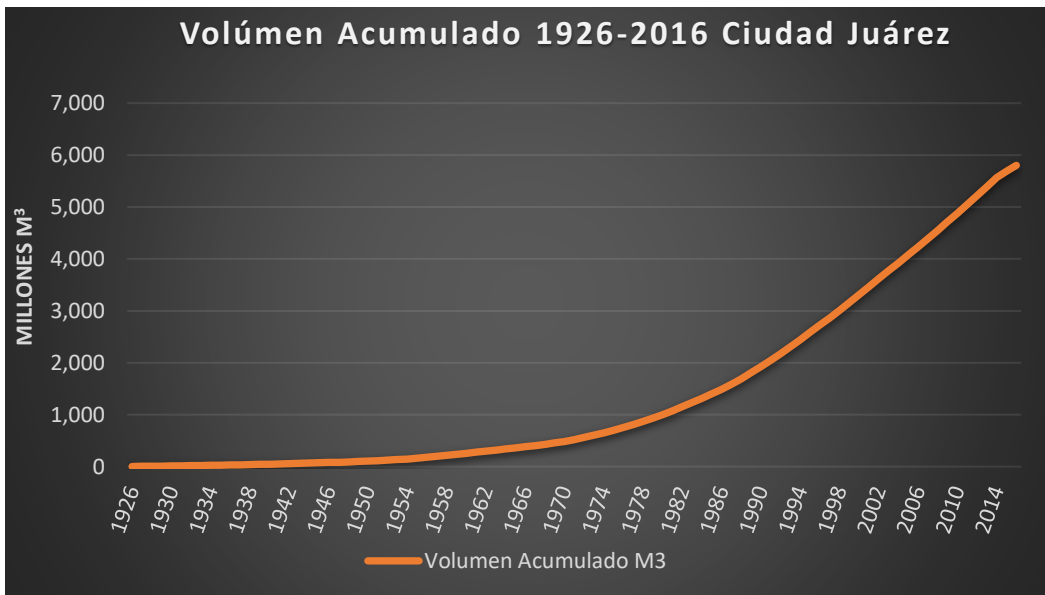


Figura 16 Volumen acumulado 1926-2016 Ciudad Juárez Chihuahua (Lemus, 2015).

A continuación, en la tabla 4 se hace un análisis de la extracción total regional concesionada del Acuífero Valle de Juárez, que comprenden los municipios de Juárez, Praxedis G. Guerrero y Guadalupe, pertenecientes al Estado de Chihuahua, la información fue recabada de la página de Conagua del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA). Que es el organismo encargado de otorgar las concesiones de derecho de agua además de proporcionar información y seguridad jurídica a los usuarios de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, a través de la inscripción de los títulos de concesión, asignación y permisos de extracción y descarga, haciendo constar la titularidad de los derechos inscritos y los cambios en sus características.

Tabla 4 Extracciones anuales por municipio.

Praxedis G. Guerrero		Guadalupe		Juarez	
Urbano	Agricola	Urbano	Agricola	Urbano	Agricola
2,165,188.00 m <sup>3</sup>	349,547,717.67m <sup>3</sup>	2,625,437.50 m <sup>3</sup>	116,480,725.75 m <sup>3</sup>	184,501,318.00m <sup>3</sup>	14,755,352.00m <sup>3</sup>

Total Anual = 670,075,738.92 m<sup>3</sup>

En la figura 17 se observa que en los municipios de Guadalupe y Praxedis G. Guerrero la extracción dominante es para fines agrícolas, casi duplicando la extracción urbana de Ciudad Juárez, en la siguiente figura mostramos la extracción por municipio en forma de gráfica.

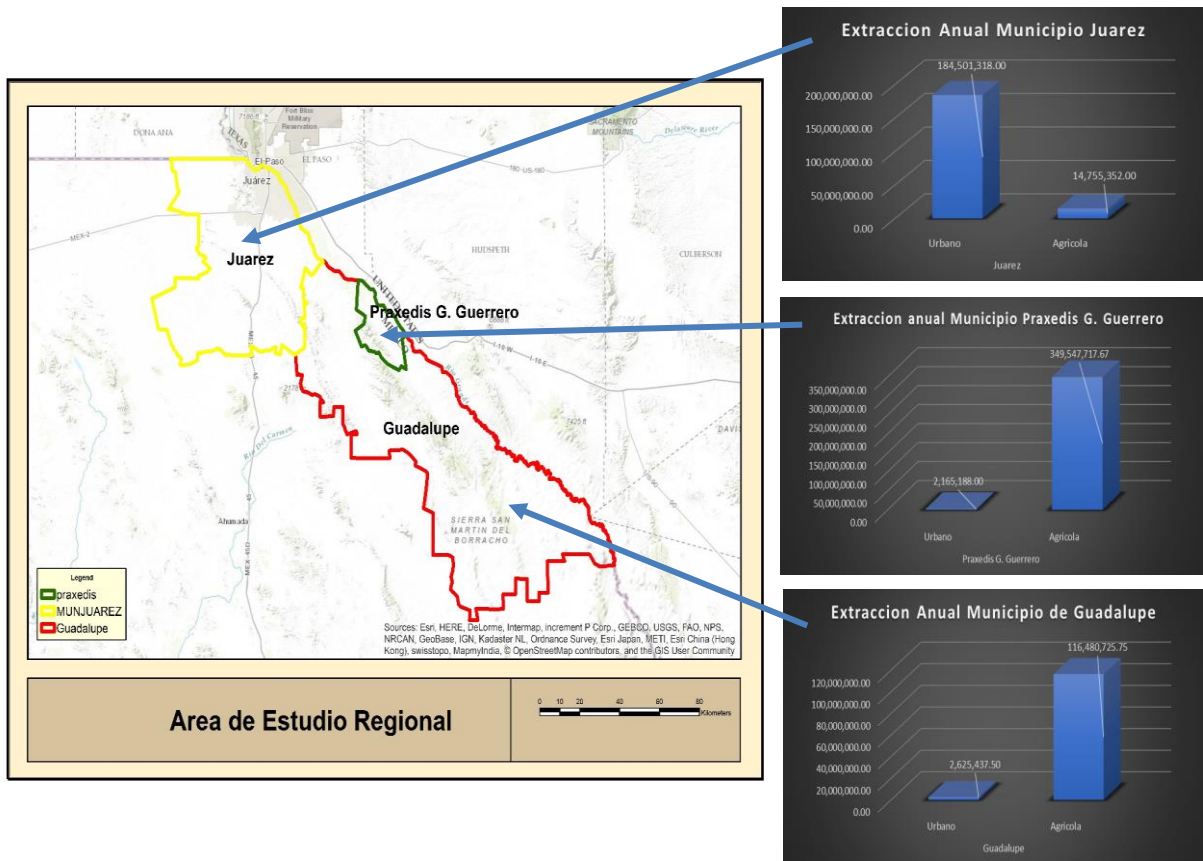


Figura 17 Extracciones anuales por municipio.

## **1.5 Planteamiento del Problema**

Los acuíferos Valle de Juárez y Conejos Médanos son las únicas fuentes de abastecimiento de agua potable de la Región Paso del Norte, en la que se incluye a Ciudad Juárez, Práxedes G. Guerrero, Guadalupe y el porvenir, que se encuentran ubicados en esta subcuenca. La extracción del agua del acuífero es a través de pozos “profundos”, generalmente de menos de 250 m de profundidad. La mayoría de estos pozos están ubicados en Ciudad Juárez, Chihuahua, y los restantes en el área Agrícola del Distrito de Riego 009 del Valle de Juárez. Dichos se encuentra en promedio a profundidades no mayor a 100 m sobre las márgenes de los Rio Bravo estando muchos de ellos con una concentración alta de salinidad. En referencia a los estudios de piezometría y evolución de los niveles estáticos del agua subterránea en el área de estudio, Meyer (1976), aprecia una gran caída de los niveles estáticos y un cambio en la dirección de flujo del agua subterránea. Estos abatimientos han sido causados por el extenso bombeo principalmente en zonas urbanas de Ciudad Juárez, Chihuahua.

Con respecto a las alternativas de sustentabilidad hídrica para la región, algunos autores proponen diversas acciones para evitar el cambio de uso de suelo, y administrar racionalmente el recurso hídrico. Por ejemplo, una de las tecnologías que permite dar respuesta a una demanda para lograr la sustentabilidad hídrica es la modelación numérica. Esta tecnología permite manejar eficazmente situaciones complejas y tratar al sistema acuífero de manera integral (por ejemplo; crecimiento urbano-disponibilidad hídrica). En este marco conceptual, el aprovechamiento de las aguas subterráneas que se encuentran en el acuífero Valle de Juárez, demanda de una caracterización integral, dentro de lo que se destaca, el conocer la dirección preferencial del flujo de agua subterráneo. Estas variaciones de los niveles estáticos y propiedades hidrogeológicas son conocidas a través de un estado inicial de la evolución de la red piezométrica del acuífero. En este sentido, a los sistemas

acuíferos se les modela matemáticamente, para generar un escenario conceptual en donde se quiere conocer su reacción hidráulica buscando obtener resultados en donde los escenarios que alcanzaría el sistema acuífero en periodos distintos de tiempo fueran variables.

Por lo anteriormente expuesto, es importante la creación de un modelo de flujo de agua subterránea ya que estos son modelos típicos, basado en la caracterización del medio físico, que permite simular y analizar la evolución piezométrica de las aguas subterráneas bajo condiciones hidrológicas específicas. Estos modelos matemáticos son instrumentos eficaces para abordar problemas ambientales y de disponibilidad y manejo del recurso hídrico (Shi, et al., 2012; Ranganathan y Palanisami, 2004).

En este sentido, se busca en la presente investigación, modelar matemáticamente la disponibilidad de agua para el Desarrollo Urbano Regional Sustentable futuro en Ciudad Juárez, Chihuahua, generando redes de flujo de agua subterránea. Con este análisis se trata de responder al cuestionamiento en donde se busca identificar una correlación entre el crecimiento urbano a través del tiempo (1980 al 2030) y la disponibilidad de agua subterránea, lo que podrá aportar elementos para orientar el crecimiento geoespacial de las ciudades en la región.

En esta investigación se analizarán de forma conjunta tres variables, que regularmente se manejan y se estudian de forma independiente, que es el proceso de expansión urbana, el cambio en el uso de suelo y vegetación, así como su evolución de escenarios futuros, provocado por el incremento poblacional, los cuales tiene un gran impacto en la disponibilidad y dirección de las aguas subterráneas. Finalizando con un modelo matemático en el paquete computacional Visual Modflow Clásico, planteando escenarios futuros del flujo subterráneo que nos permitirán evaluar desde una perspectiva de sustentabilidad hídrica subterránea en los planes futuros de desarrollo urbano.

Una de las variables más importantes, es sin duda el crecimiento demográfico que se ha convertido desde hace varias décadas, en un tema de primer orden, debido a la presión excesiva de la población sobre los recursos naturales disponibles en especial sobre los recursos hídricos. La alta tasa de nacimientos y la reducción de la mortalidad, gracias al avance de la medicina agravan la situación. La concentración urbana de la población esta evidentemente relacionada con factores históricos culturales económicos y sociales. El hombre ha intervenido directa e indirectamente, sobre el medio ambiente, y somos los responsables de que nuestro medio se vea sometido a un proceso de aceleración y degradación de nuestros recursos naturales.

### **1.6 Crecimiento Demográfico**

Hacia el año 8000 antes de iniciarse la era cristiana, la estimación del tamaño de la población mundial era de unos ocho millones de habitantes (Weeks, 1981). Esto implica un incremento natural de unas 15 personas por cada millón al año. Así, durante los primeros años de existencia, la humanidad contaba con el mismo número de habitantes que cualquiera de las grandes ciudades actuales (Alcañiz, 2008). Después de esta fecha vienen grandes cambios, primero con la llamada revolución agrícola donde se descubre la agricultura y la domesticación de los animales, el hombre dejo de ser nómada y empezó a mejorar la calidad de vida, y por ende el aumento de la población, al inicio de la época cristiana el planeta contaba con poco más de 252 millones de seres humanos y al inicio del primer milenio (hacia los 1100) la población ya contaba con más de 400 millones, a continuación se presenta la tabla 5 donde se muestra la población mundial desde los años 1500 a 1900.

Tabla 5 Evolución de la Población Mundial (en millones de habitantes) (Vallin, 1993).

Año	África	América	Asia	Europa	Oceanía	Total Mundial
1500	87	42	245	84	3	461
1600	113	13	338	111	3	578
1700	107	12	433	125	3	680
1750	104	18	500	146	3	771
1800	102	24	631	195	2	954
1850	102	59	790	288	2	1241
1900	138	165	903	422	6	1634

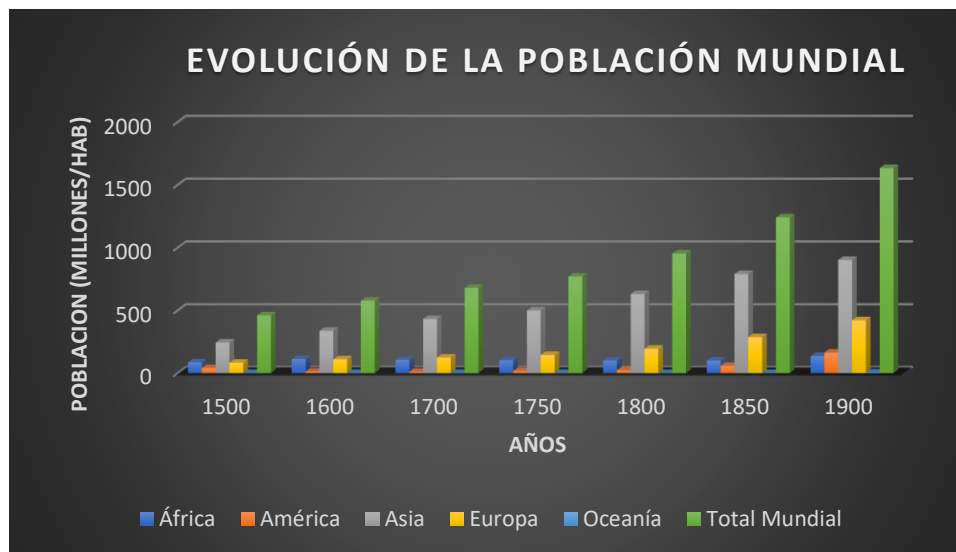


Figura 18 Evolución de la Población Mundial (Vallin, 1993).

Durante los 500 años considerados, la población experimenta un crecimiento notable al cuadruplicarse su número como lo vemos en la figura 18. El continente europeo incrementa su población como consecuencia del inicio de la caída de la mortalidad, mientras que las poblaciones americana y africana sufren verdaderos descalabros demográficos como consecuencia del descubrimiento y del proceso de colonización, del contacto con nuevas enfermedades que desconocían anteriormente (Diamond, 1997), así como por el hecho vergonzoso para la historia europea del tráfico de esclavos proveniente de África y con dirección al continente americano. Sólo a principios del siglo XX comienzan a recuperarse estas poblaciones con motivo, sobre todo en América, de las oleadas de emigrantes que llegaron al nuevo continente en busca de mejores condiciones de vida (Alcañiz, 2008).

Ya para comienzos de 1900 las dinámicas poblacionales dan un giro y marcan al Siglo XX como uno único en la historia moderna de la humanidad al casi cuadruplicarse la población pasando de 1634 millones a más de 6000 millones al concluir el siglo pasado, esto sin duda se dio por al considerar, la baja en la mortalidad como un factor demográfico determinante que se expande a nivel global con la movilidad de medicamentos, infraestructuras hospitalarias, mejora en la alimentación y eliminación progresiva de las enfermedades endémicas a muchas sociedades (Alcañiz, 2008). Se expone a continuación en tabla 6 el cambio en la distribución de la población por continentes.

Tabla 6 Población Mundial 1900-2025 (en millones de habitantes) (Vallin, 1993).

Año	África	América	Asia	Europa	Oceanía	Total, Mundial
1900	107	145.5	901	415	6.75	1575
1925	142	222.9	1109	510	10	1992
1950	224	331.7	1377	571.7	12.6	2517
1975	414	559.1	2355	705.3	21.4	4077
2001	818	841	3720	727	30.7	6137
2025	1268	1079	4714	917	40	7818

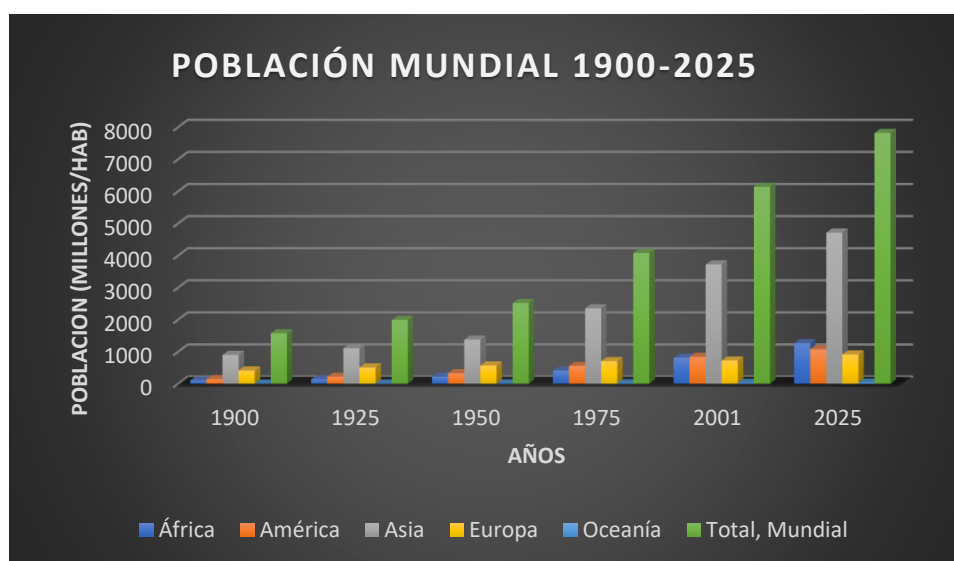


Figura 19 Población Mundial 1900-2025 (Vallin, 1993) .

Como se puede apreciar en la figura 19 la población mundial va en aumento y es un reflejo del aumento de la población en cada país y ciudad del mundo, podríamos considerar la caída de la mortalidad como el primer fenómeno demográfico que se expande a nivel global con motivo de la exportación de medicamentos, infraestructuras hospitalarias, mejora en la alimentación y eliminación progresiva de las enfermedades endémicas a muchas sociedades (Alcañiz, 2008).

En lo que respecta a México a lo largo del siglo XX la población mexicana pasó de 13,6 a 97,5 millones de habitantes al crecer a tasas en torno al 3% anual entre 1940 y 1980. Aunque esta tendencia se ha reducido y la tasa promedio de crecimiento anual de los últimos años ha sido menor al 1,50%, la transición demográfica aún está en progreso, y México cuenta con una gran número de jóvenes. La ciudad más poblada del país es la capital, la Ciudad de México, aproximadamente el 50% de la población vive en una de las 55 áreas metropolitanas del país.

Recuento histórico de la población de México en el periodo 1700 -2015

- En el siglo XVIII la población mexicana era de 3 a 4 millones de personas.
- En el momento de independizarse, el país tenía cerca de 6 millones de habitantes, aunque se redujo a 5 millones tras las guerras de independencia (1808-1822).
- En 1825 tenía 6,8 millones de habitantes,
- En 1838 tenía 7,8 millones de habitantes, incluyendo una gran colonia de norteamericanos en Texas, tras la independencia de ese estado la población cayó a 7 millones.

- En 1846 al iniciarse la guerra con Estados Unidos el país tenía 7,5 millones de habitantes.
- En 1858, al llegar a la presidencia Benito Juárez, el país tenía 8,3 millones de personas, aunque tras la guerra civil ésta se redujo a 8,2 millones.
- En 1862 la población era de 8,8 millones, tras la invasión francesa en 1868 era de 8,396 millones.
- En 1872 al morir Juárez, la población era de 9 millones.
- En 1876 año en que se inicia la presidencia de Porfirio Díaz, había 9,5 millones de mexicanos.
- En 1900 eran 13,6 millones de habitantes.
- En 1910, al inicio de la Revolución mexicana, el país tenía 15,2 millones de habitantes. Para cuando terminó, el país tenía 14,3 millones de habitantes.
- En 1929, con la Gran Depresión, el país tenía 15,6 millones de habitantes.
- En 1940 había 19,6 millones de mexicanos.
- En 1950 eran 25,8 millones.
- En 1960 eran 34,9 millones.
- En 1970 eran 48,2 millones.
- En 1980 eran 66,8 millones.
- En 1990 eran 87,06 millones.
- En 2000 eran 100,90 millones.

- En 2010 eran 112,3 millones.
- En 2015 eran 119.5 millones.

Estos datos los podemos ver reflejados en la figura 20 donde podemos apreciar que de 1800 a 1872 la población no tuvo un crecimiento acelerado la población se mantuvo estable, pero a partir de los últimos 65 años, la población en México ha crecido poco más de cuatro veces. En 1950 había 25.8 millones de personas, en 2015 hay 119.5 millones, del 2010 a 2015, la población se incrementó en 7 millones de habitantes, lo que representa un crecimiento promedio anual de 1.4%.



Figura 20 Habitantes en México durante el periodo de 1900-2015 (INEGI, 2015).

Se presentan las proyecciones de población de México en la figura 21 para el horizonte 2010-2050 dicha información es necesaria y relevante para llevar a cabo la planeación demográfica, económica y social del país, al mismo tiempo que una herramienta de conocimiento valiosa para estimar múltiples requerimientos futuros en servicios e infraestructura, así como otras necesidades sociales.

Esta estimación fue elaborada por el Consejo Nacional de Población (CONAPO) en el año 2015. Según el censo del año 2000, el crecimiento de la población en México ha seguido un patrón más o menos similar al del resto del mundo. De 16 millones de habitantes en 1930, llegó a 25.8 en 1950 y a 100.90 a finales de 1900. Por su parte, el Censo General de Población y Vivienda del 2010 registró una población de 112.3 millones de habitantes. El mayor incremento se dio entre 1970 y 1980, un aumento de aproximadamente 18 millones de habitantes en tan solo una década.

En 1950 México ocupaba el décimo séptimo lugar entre los países más poblados del mundo, en 2000 ocupó el décimo primero, y se estima que mantendrá esa posición hasta 2050 de acuerdo con las Naciones Unidas (Área de Población). La tasa de crecimiento demográfico ha pasado de 3.4% anual en 1970 a 1.4% en 2010.

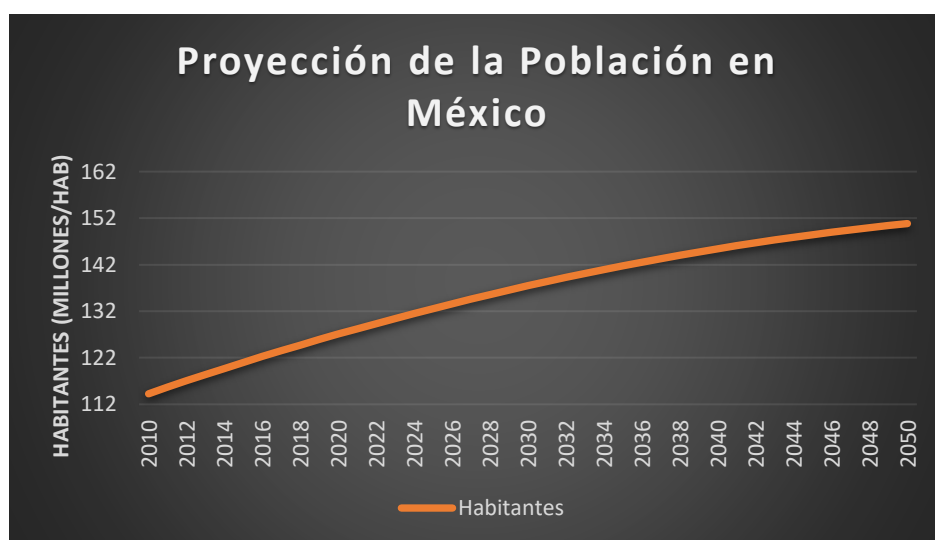


Figura 21 Proyección de la población en México 2010-2050 (CONAPO, 2015)

La información estimada por la CONAPO nos muestra un aumento de la población de 2010 al 2050 de forma logarítmica con una población estimada de 114.25 millones para el 2010, 137.48 al 2030 y 150.87 para el 2050 como se puede ver en la figura 21.

Según el II Censo de Población y Vivienda llevado a cabo por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con fecha censal del 12 de junio de 2010, el total de población del Estado de Chihuahua es de 3,406,465 habitantes, lo cual le da el 11° lugar entre las entidades federativas de México por población. De este total poblacional, 1,692,545 son hombres y 1,713,920 son mujeres. La tasa de crecimiento anual para la entidad durante el período 2005-2010 fue del 1.0%. Esto lo podemos ver en la figura 22.



Figura 22 Población histórica del Estado de Chihuahua 1921-2015 (INEGI, 2015).

Con la información de la Encuesta Intercensal, se estima que en el Estado de Chihuahua residen en el total de 3,556,574 personas en el estado en el 2015, al revisar el comportamiento de la tasa de crecimiento promedio anual de la población. En el periodo de 1990 a 2000 fue de 2.3%; disminuyendo a 1.1% del 2000 al 2010, este valor entre el 2010 y 2015 donde se estimó una tasa de 1%.

Ciudad Juárez y Chihuahua son los municipios con mayor población; juntos concentran el 63.8% de residentes en el estado. La mayoría de los municipios muestran crecimiento en su

población en el último quinquenio; sin embargo, este crecimiento muestra diferencias entre cada uno de ellos. De los 32 municipios del estado que tienen mayor población destacan Aquiles Serdán, Aldama, Ahumada, Cuauhtémoc, Delicias y Casas Grandes con los valores más elevados en las tasas de crecimiento; por el contrario, con tasas negativas se encuentran Guerrero, Madera, Bocoyna, Saucillo, Balleza, Guachochi y Batopilas.



Figura 23 Proyección de la población del Estado de Chihuahua 2010-2030 (CONAPO, 2015).

La información estimada por la CONAPO nos muestra un aumento de la población de 2010 al 2030 de forma casi recta con una población estimada de 3.40 millones habitantes para el 2010, 3.88 al 2020 y 4.18 para el 2030 como se puede ver en la figura 23.

La tasa anual de crecimiento de Ciudad Juárez se redujo al 8,34% anual durante el periodo 2000-2005, cuando en periodos anteriores mantenía tasas superiores al 5%. Lo anterior es debido a la desaceleración de la industria maquiladora en la frontera mexicana, a la

competencia de los productos chinos y al surgimiento de altos índices de violencia en Ciudad Juárez Chihuahua.

Ciudad Juárez cuenta con 1,391,180 habitantes según la información de la Encuesta Intercensal 2015, siendo la ciudad más poblada del estado de Chihuahua, y la octava zona metropolitana de México. Junto con El Paso, Texas, crean un área binacional de casi más de 2 millones y medio de habitantes, siendo la segunda área binacional más grande de México, por debajo de Tijuana-San Diego.

Se presenta a continuación, un resumen de cómo se ha comportado el crecimiento de la población en los últimos 115 años de la cabecera de Ciudad Juárez, se puede apreciar el incremento en las décadas, así como la tasa de crecimiento media anual presentada. Se observa que la mayor tasa de crecimiento ocurrió en el año de 1995, con un 4.75%.

Históricamente Ciudad Juárez se ha caracterizado por sus niveles altos de crecimiento de población debido principalmente, a la constante llegada de inmigrantes a la ciudad. Estas tasas de crecimiento son de las más altas que se han presentado en el México contemporáneo. Tan sólo durante el periodo transcurrido entre 1940 y el 2000, la cantidad de habitantes pasó de poco más de 48,881 personas a más de 1,187,000 millones. Este proceso se tradujo en tasas de crecimiento promedio anual tan altas que rondaron el 9% en la década de los cuarenta y por debajo del 4% en los noventa, decenio en el que el monto de la población se incrementó en casi 397,000 nuevos habitantes.

La principal razón de este rápido crecimiento se relaciona, con la alta movilidad de personas que se han desplazado hasta esta ciudad en el pasado, y, aunque cada vez con menor frecuencia, por migrantes que no pudieron lograr su cometido de llegar a Estados Unidos y

se han quedado a residir en la ciudad. Al tiempo que la dinámica del mercado de trabajo local ha generado una alta demanda de fuerza laboral, sobre todo en los últimos treinta años, mucha de la cual ha tenido que llegar desde fuera puesto que la oferta de mano de obra local no ha solventado los puestos de trabajo generado (Gómez, 2005). La tasa anual de crecimiento de Ciudad Juárez se redujo al 3.58 % del año 2000 al 1.85% al 2005, cuando en periodos anteriores mantenía una tasa creciente rondando los 4%. Por lo anterior la disminución es debido por una parte a la desaceleración de la industria maquiladora en la frontera mexicana, a la competencia de los productos chinos y principalmente al surgimiento de altos índices de violencia en la ciudad, en los años subsiguientes decreció rápidamente hasta llegar al 0.30%, para después repuntar en el último conteo de población y vivienda con 1.04% en 2015 como se aprecia en la tabla 7

Tabla 7 Tasa de Crecimiento de la Población Histórica de Ciudad Juárez Chihuahua (INEGI, 2015).

No.	Año	Población total (hab)	Geométrico por incremento		Geométrico por interés compuesto	Tasa de crecimiento media anual (T.C.M.A.)
			Habitantes	Por ciento		
1	1900	8,218	-	-	-	-
2	1910	10,621	2,403	29.24%	0.0257	2.6
3	1921	19,457	8,836	83.19%	0.055	5.66
4	1930	39,669	20,212	103.88%	0.0792	8.24
5	1940	48,881	9,212	23.22%	0.0209	2.11
6	1950	122,566	73,685	150.74%	0.0919	9.63
7	1960	262,119	139,553	113.86%	0.076	7.9
8	1970	407,370	145,251	55.41%	0.0441	4.51
9	1980	544,496	137,126	33.66%	0.029	2.94
10	1990	789,522	245,026	45.00%	0.0372	3.79
11	1995	995,770	206,248	26.12%	0.0464	4.75
12	2000	1,187,275	191,505	19.23%	0.0352	3.58
13	2005	1,301,452	114,177	9.62%	0.0184	1.85
14	2010	1,321,004	19,552	1.50%	0.003	0.3
15	2015	1,391,180	70,176	5.31%	0.0104	1.04
		Total	<b>1,382,962</b>		<b>0.5722</b>	<b>4.6</b>

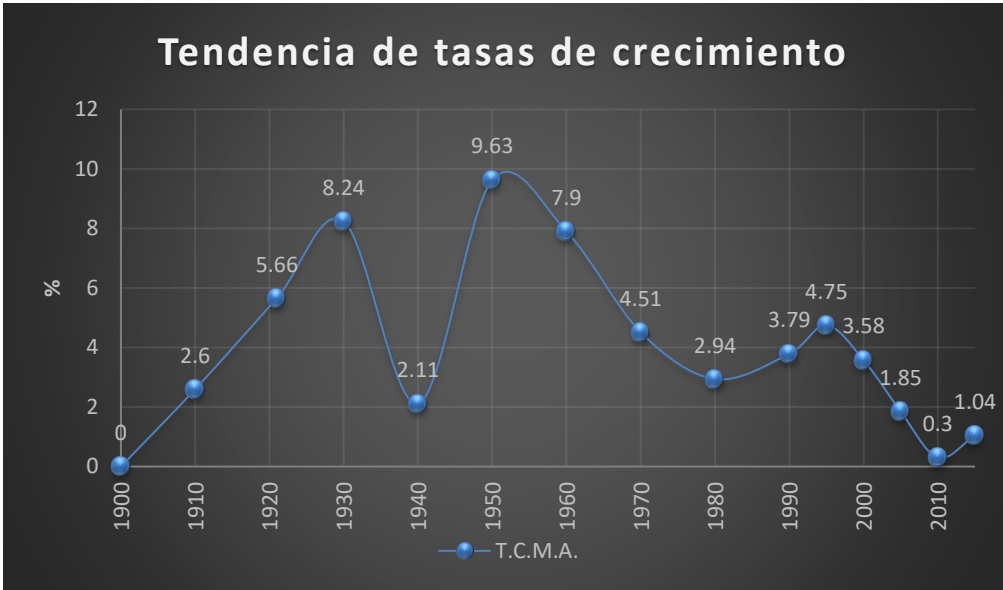


Figura 24 Tasa de Crecimiento de Población Histórica (INEGI, 2015).



Figura 25 Población Histórica de ciudad Juárez chihuahua 1900-2015 (INEGI, 2015).

Pero a pesar de todos los problemas que ha tenido que enfrentar Ciudad Juárez su crecimiento demográfico logro despuntar 1.04% en 2015 con una población de 1,391,180 como lo vemos en la figura 25. Se espera que para el año 2030 se llegue a tener una población

de 1,593,238 habitantes según la proyección de CONAPO como lo vemos en la figura 26 donde el crecimiento es de forma lineal.

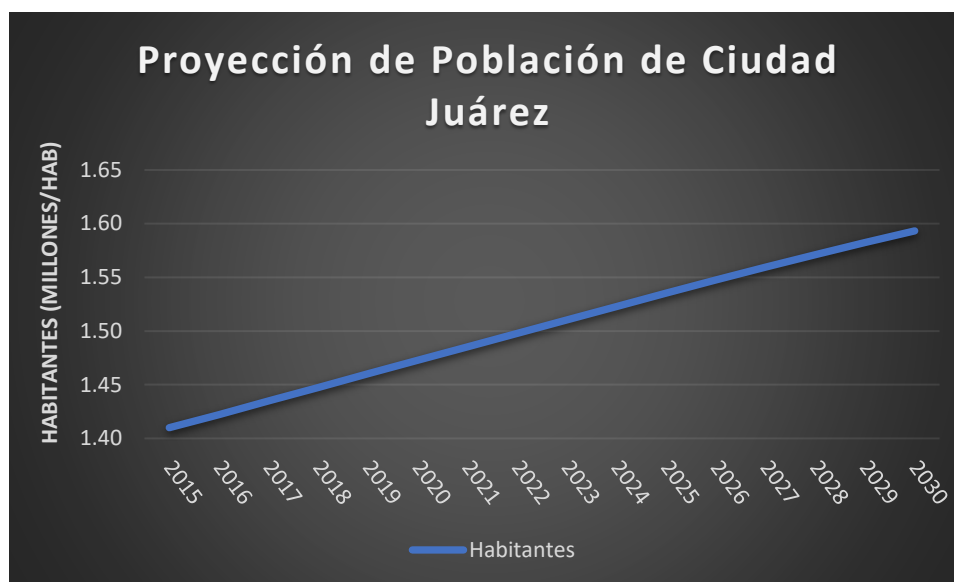


Figura 26 Proyección de población de Ciudad Juárez 2010-2030 (CONAPO, 2015).

Como lo hemos analizado anteriormente en los últimos 30 años, se ha experimentado un acelerado aumento poblacional. Esto debido a que el cambio de uso del suelo está influenciado por factores directos como las actividades productivas, e indirectos, como el cambio poblacional, que se revisó anteriormente (Bonilla, 2012).

### **1.7 Cambios de Uso de Suelo**

El crecimiento poblacional y el interés creciente de conocer los cambios de usos del suelo que se han producido en un territorio, conocer por qué se han propiciado y las consecuencias que han generado, dichos cambios tienen implicaciones tanto ambientales, sociales y económicas. Mediante su estudio, se puede recabar información sobre el estado de la biodiversidad, así como del paisaje, que ha experimentado una región. La reconstrucción de la historia de cambios de usos del suelo constituye un conocimiento crucial para analizar los

cambios actuales y predecir los que podrían darse en el futuro, no de lo que va a pasar sino como una herramienta práctica de interpretación y de análisis (Gallardo, 2014).

Los modelos de simulación son una herramienta para la elaboración de imágenes de tendencia para el ejercicio de planificación. La proyección de escenarios ha ganado en importancia como un enfoque para analizar el futuro de una manera estructurada e integrada; por lo que está empezando a convertirse en una herramienta ampliamente utilizada (Gallardo, 2014).

Pero este tipo modelos de simulación urbanos no han sido los más desarrollados; la mayoría se han centrado en los usos agrícolas o forestales, por ser éstos los que mayor extensión. “La urbanización, como uso del suelo, ocupa menos del 2% de la superficie de la tierra, por lo que ha sido muchas veces ignorada; sin embargo, se espera que para el año 2025, el 60% de la población viva en áreas urbanas. Para la creación de escenarios urbanos se utilizan habitualmente modelos de autómatas celulares, por su flexibilidad a la hora de manejar reglas que determinan cambios en áreas urbanas” (Gallardo, 2014).

Vitousek (1997) documenta que este tipo de análisis permite entender las causas y consecuencias de las tendencias de los procesos de degradación, desertificación, disminución de la biodiversidad, y en general, pérdida principalmente del capital natural. Así, desde una perspectiva puramente académica resulta obvia la relevancia de las bases de datos de cambio de cobertura y uso del suelo para documentar los procesos antes descritos.

Fernández (2003). Nos dice que, a partir del análisis de cambio y uso de suelo, se deducen escenarios sobre la pérdida del capital natural o biodiversidad, se generan modelos sobre los

posibles efectos del cambio global y se fundamentan las estrategias de planificación de uso del suelo.

México un país que no escapa de las tendencias mundiales, “ya que dentro de sus casi dos millones de kilómetros cuadrados de superficie se observan una gran cantidad de cambios que en general están por arriba de la media mundial en cuanto a tasas de deforestación, incremento de las áreas de cultivo y pastoreo, expansión urbana y muchos otros bien documentados” (Mas et al., 2004; Sánchez-Colon et al., 2008).

Los estudios de caso en México muestran que los métodos utilizados en general son diferentes; indefinidos en cuanto a los parámetros y variables que se incluyen; incomparables en términos de las categorías que utilizan y con escalas de trabajo incompatibles (Palacio et al., 2000; Velázquez et al., 2002).

En el estado de Chihuahua en los últimos años se han venido incrementado fuertemente los estudios sobre el cambio y uso de suelo y vegetación principalmente para Ciudad de Cuauhtémoc como el artículo de Antillon et al., (2015) que determino los cambios del uso del suelo durante los años 1986, 1998 y 2011, usando tres imágenes del satélite Landsat TM, para obtener las coberturas y uso de suelo de la Laguna de Bustillos, municipio de Cuauhtémoc Chihuahua, México. aplicando el método de clasificación supervisada Máxima posibilidad, y finalmente se hizo un análisis de los cambios por medio de matrices, obteniendo el área agrícola que ha ido ganando terreno y avanzando sobre las otras categorías presentes, principalmente sobre vegetación natural dispersa y sobre suelo desnudo. La investigación de Diaz et al., (2014). “Presenta un análisis geoespacial del uso del suelo y agua en el área peri-urbana de Ciudad Cuauhtémoc. Mediante modelación geográfica y percepción remota se evalúa la dinámica del uso y cobertura de suelo. Los resultados indican

que los procesos de cambio de uso del suelo y cubierta vegetal ocurren en un contexto de alta competencia por el agua entre diversos usuarios. Este proceso usualmente no se considera en los estudios que miden la expansión espacial urbana, pero debe considerarse para comprender integralmente los efectos del crecimiento urbano en el territorio” (Diaz et al., 2014). En el 2010 una investigación realizada por González (2010) predijo del crecimiento urbano de Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua del año 2010 mediante el programa computacional SLEUTH, el cual se basa en el análisis de autómatas celulares a partir de datos históricos del crecimiento urbano, La comparación entre el modelo de predicción generado para el año 2010 y la imagen Landsat-TM del mismo año, mostró las áreas y porcentajes de coincidencia entre el crecimiento predicho y el real.

En Ciudad Juárez, Chihuahua, las políticas vigentes de planificación urbana y sus antecedentes históricos de crecimiento urbano, presenta una intensa expansión de su mancha urbana de 1950 a 2015, La interacción y dinámica que presentan las ciudades industriales de la frontera norte les imprimen rasgos particulares de crecimiento económico y demográfico que conforman sus tendencias de urbanización. Ciudad Juárez es una de estas ciudades, en las que la contigüidad geográfica con la comunidad de El Paso, Texas, ha definido un crecimiento urbano disperso y desorganizado, donde han aparecido actores y procesos que crearon problemas ambientales.

Se tiene registro del crecimiento de la mancha urbana de Ciudad Juárez desde el año de 1856, que se han caracterizado por ser muy expansivas principalmente desde la década de 1950, que representaba únicamente 909.22 ha. lo que era más del doble de lo que representaba en 1940 con apenas 379.14 ha. con una densidad de 134.80 hab/ha, con una población de 122,562.853 habitantes según el IMIP (2016) básicamente la población se concentraba en

que hoy es el centro histórico de la ciudad y la parte de Zaragoza DB. Como lo vemos en la figura 27.

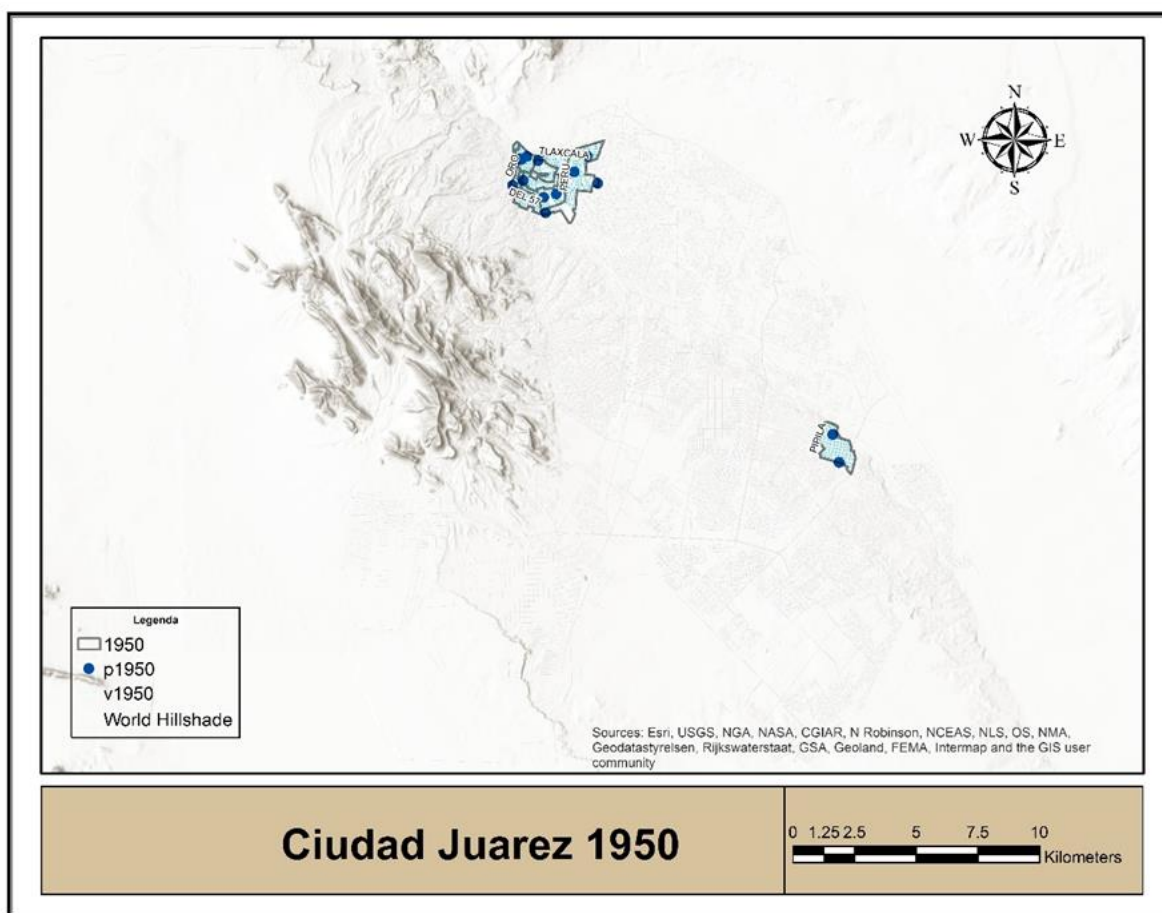


Figura 27 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década de 1950.

Después de esta década se presenta una explosión de crecimiento en la década de los años sesentas, por lo que se tiene una extensión territorial de 2,155.15 ha. y una densidad de 85.54 hab/ha., lo que significa que cuadruplicó su tamaño con respecto de la década anterior disminuyendo considerablemente la densidad respecto a la década anterior, para esta década su población de 184,351.531 habitantes básicamente su crecimiento rodea al centro histórico actual. Figura 28.

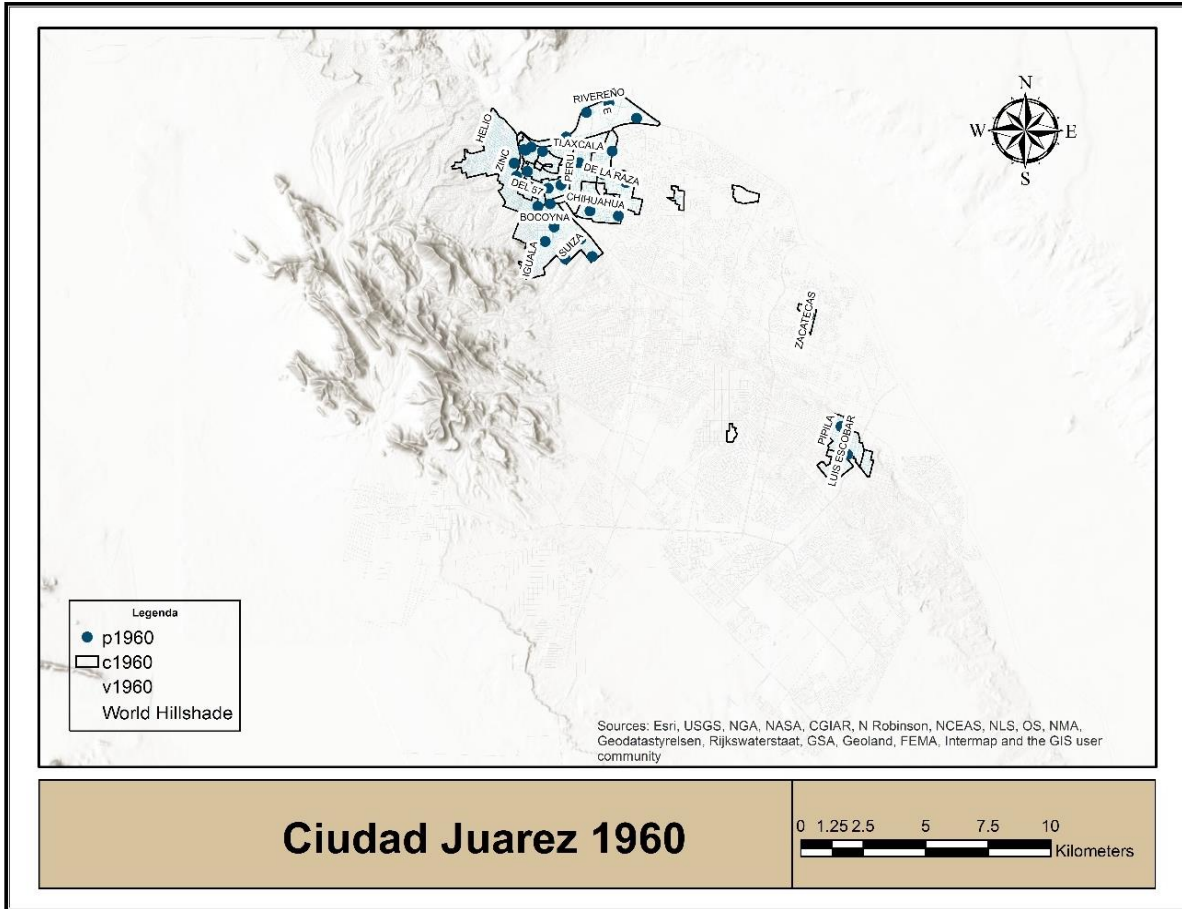


Figura 28 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década de 1960.

Después de la década de los sesentas no se vuelve a presentar esta explosión de crecimiento en los siguientes años, sin embargo, si se continúa teniendo la tendencia de expansión del crecimiento y dispersión de la mancha urbana característicos de la ciudad. En la década de los setentas la tendencia será la de, aproximadamente, duplicar su tamaño; por ejemplo, se muestra una superficie de 5,899.63 ha y una densidad de 69.05 hab/ha., acercándose bastante al doble de su tamaño diez años antes, su población de 407,369.45 habitantes básicamente se situaban al poniente de la ciudad, y al oriente apareciendo colonias como Fidel Ávila y Satélite, figura 29.

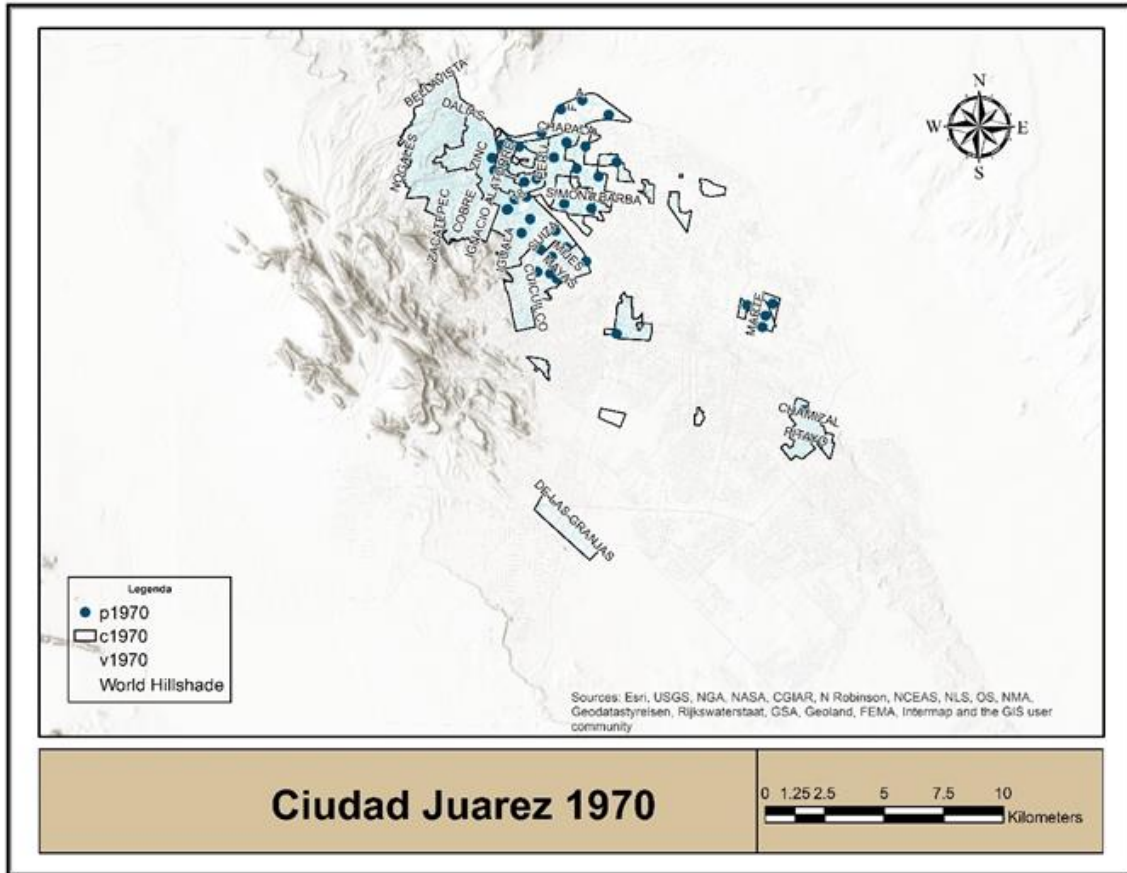


Figura 29 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década de 1970.

En la década 1980 la ciudad presenta 10,795.11 ha de superficie y densidad de 50.44 hab/ha. creciendo en total 4,895.48 ha. respecto a la década anterior. Para esta década se contaba con una población de 544,505.35 habitantes básicamente su crecimiento se centra al sur poniente de la ciudad, y al sur de Ciudad Juárez Chih. Figura 30.

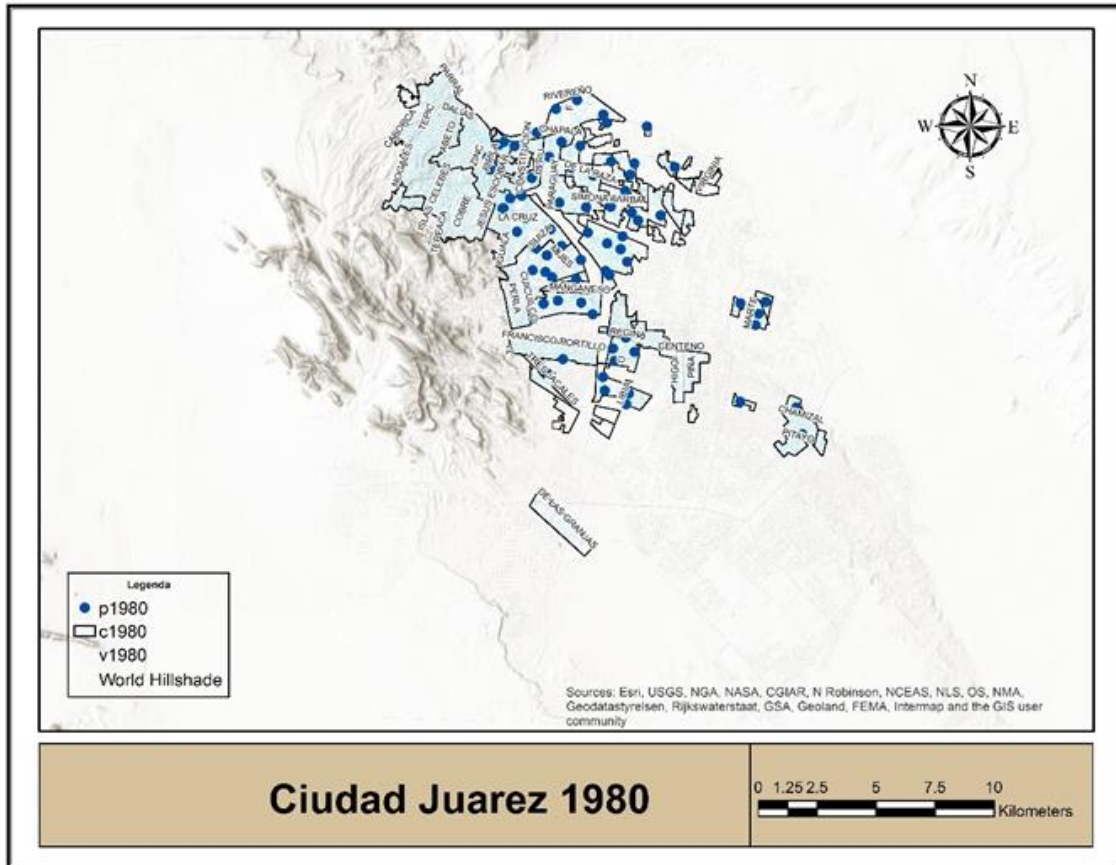


Figura 30 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década de 1980.

Para la década de 1990 la ciudad presentaba una superficie de 14,049.30 ha y una densidad de 56.20 hab/ha. con un crecimiento de 3,254.19 ha. respecto de la década anterior, lo cual indica que en los años ochenta el crecimiento tendió a reducirse tomando en cuenta su tamaño total. Para esta década se contaba con una población de 798,499 habitantes básicamente su crecimiento se centra al centro y sur de Ciudad Juárez Chihuahua. Figura 31.

Durante el primer quinquenio de los años noventa se presenta de igual manera un cambio de tendencia nuevamente y llegando a crecer solamente 1,314.44 ha. hacia el año 1995, sin embargo, el crecimiento del segundo quinquenio de los años noventa fue de 5,189.26 ha. lo que representa 6,503.7 ha. de crecimiento total, una densidad de 58.80 hab/ha., y una

superficie de 20,553.00 ha para el año 2000. Para esta década se contaba con una población de 1,218,817 habitantes su crecimiento se generaliza por toda la ciudad, lo vemos en la figura 32.

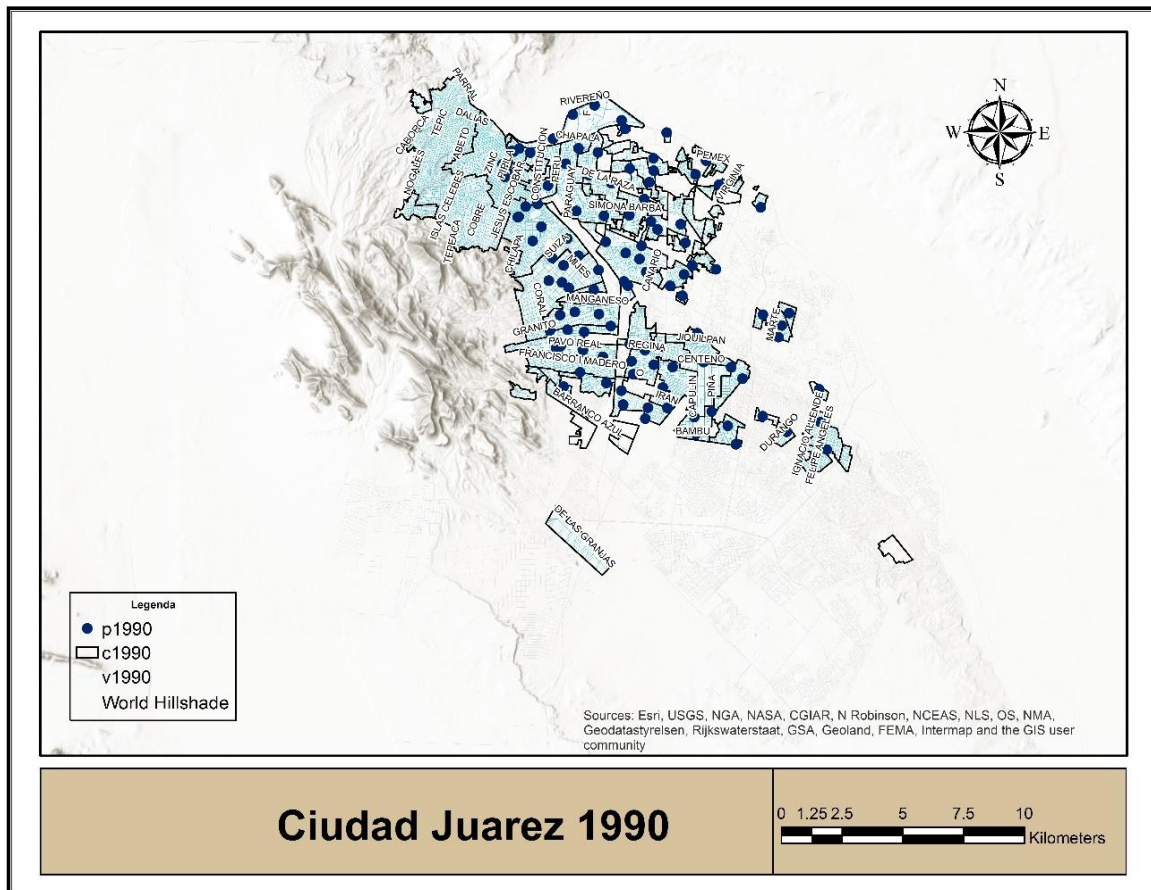


Figura 31 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década de 1990.





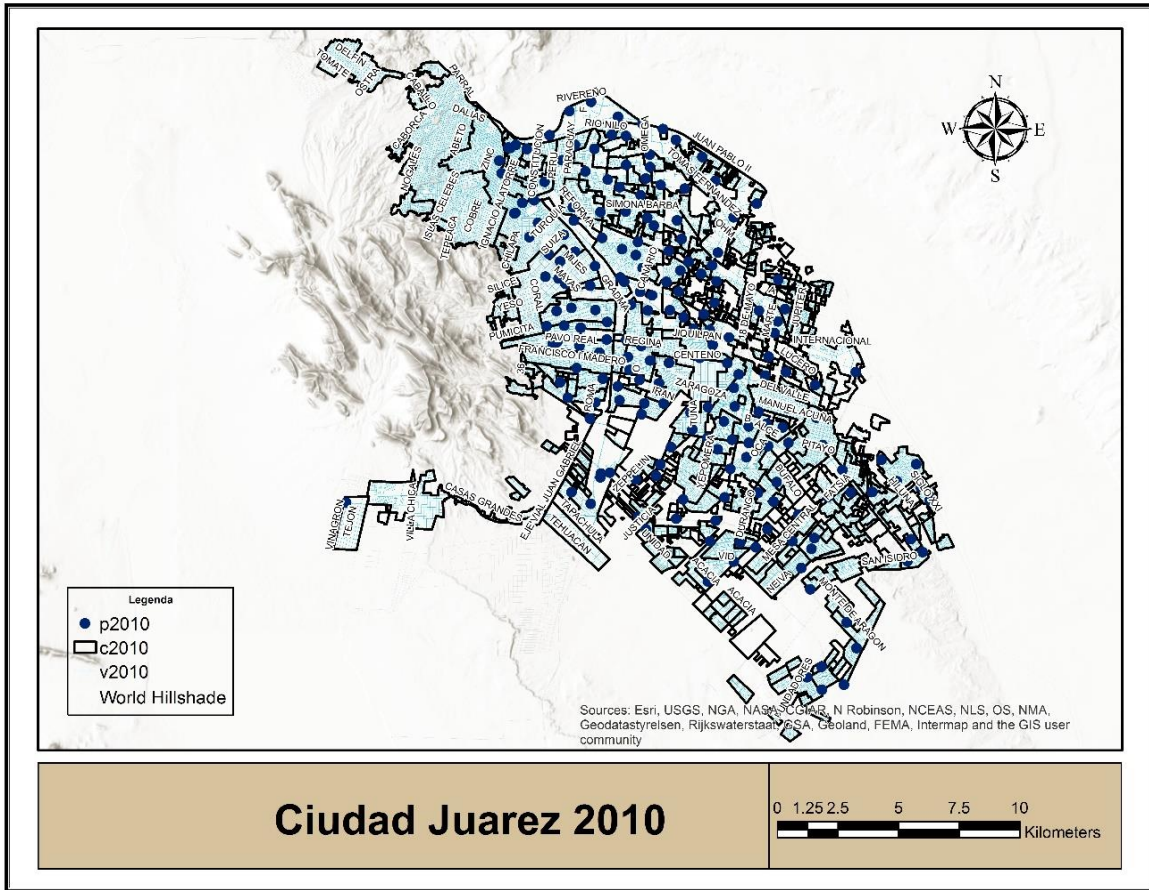


Figura 34 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua en la década del 2010.

Finalmente, el siguiente quinquenio hacia el año 2015, el crecimiento sólo fue de 1,514.08 ha y una superficie total de 32,119.57 ha. con una densidad de 41.82 hab/ha., lo que demuestra la tendencia de crecimiento expansivo de la ciudad. Para mitad de la década se cuenta con una población de 1,391,180 habitantes su crecimiento se generaliza por toda la ciudad sobre todo en el área sur oriente de la ciudad propiciando más la dispersión, como se aprecia en la figura 35.

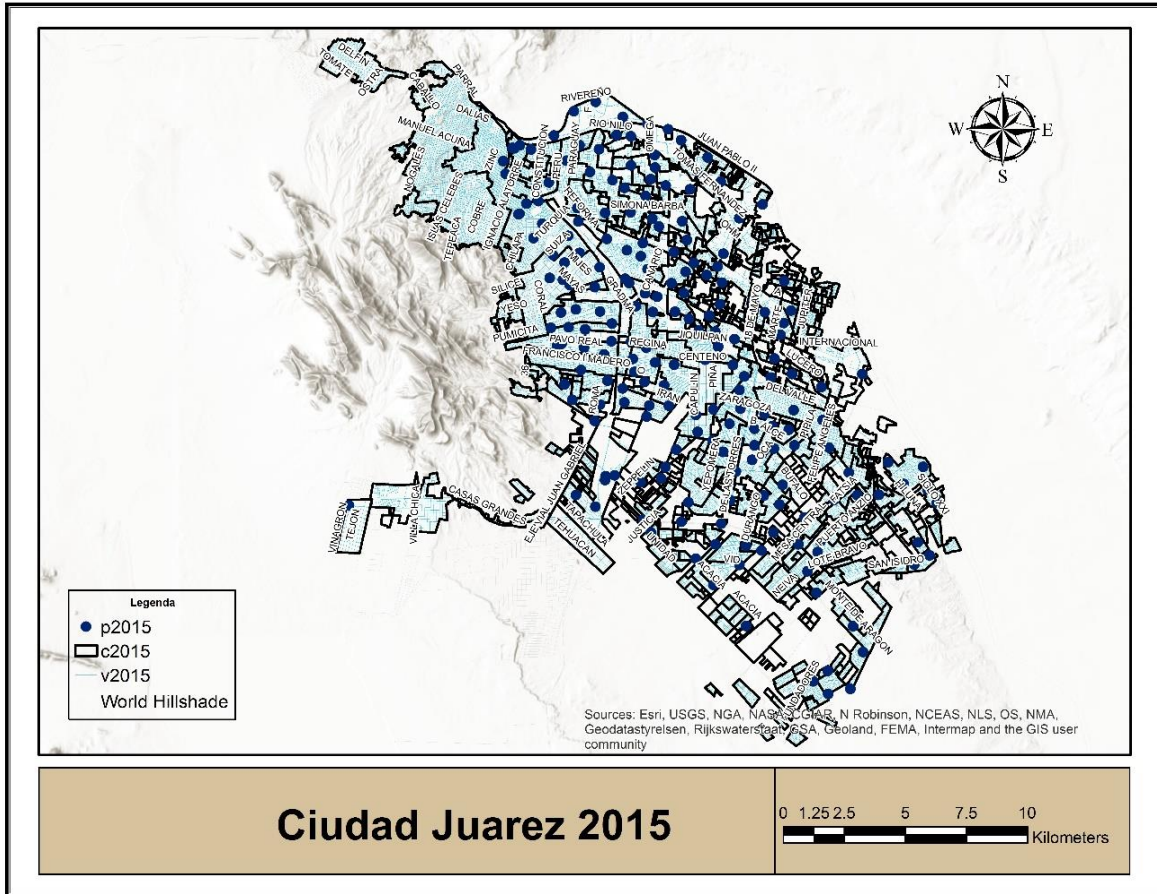


Figura 35 Mancha urbana de Ciudad Juárez Chihuahua 2015.

Con el análisis de crecimiento poblacional expuesto en párrafos anteriores, una de las amenazas más graves sobre los recursos hídricos subterráneos es la degradación de los ecosistemas, que a menudo tiene lugar a causa de cambios de uso de suelos y vegetación, como el desmonte, la transformación de los paisajes naturales en tierras agrícolas, el crecimiento urbano, la construcción de carreteras y la minería a cielo abierto. Cada uno de los cambios en el paisaje tiene un impacto específico, por lo general directamente sobre los ecosistemas naturales, y directa o indirectamente sobre los recursos hídricos subterráneos. Por lo cual la disponibilidad de agua, en cantidad y calidad, es hoy en día una pieza clave para el desarrollo de las poblaciones, mismas que ejercen presión sobre el recurso. La cantidad y naturaleza de esta presión pueden llegar a deteriorar profundamente

la condición del agua como recurso, disminuyendo con esto su aprovechamiento e inclusive su uso para las necesidades más vitales. Esta situación puede convertirse en freno del desarrollo de naciones, tras lo cual se requiere de acciones en parte o en todo el proceso de aprovechamiento del agua con el fin de optimizarlo desde una perspectiva del desarrollo urbano (Manzano-Solís, 2007).

## 1.8 Estudios Previos

Los informes y estudios previos, así como información diversa se recabaron principalmente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento de Ciudad Juárez Chih., y del Distrito de Riego 09 donde se hace un recuento de los estudios que se han realizado desde 1970 a 2005 donde se hace un breve resumen de los datos más importantes y los resultados obtenidos, resaltando que estos documentos en extenso no están disponibles para consulta el resumen se muestra en las tabla 8.

Tabla 8 Estudios previos del Acuífero Bolsón del Hueco (Valle de Juárez) (CONAGUA 2008).

NOMBRE	TIPO	RESUMEN	AÑO
<p>Secretaría de Recursos Hidráulicos "Estudio para la Rehabilitación del Distrito de Riego del Valle de Juárez, Chih." C.I.E.P.S., s.c. Ingenieros Consultores y Proyectistas.</p>	<p>Estudio</p>	<p>Este estudio integral, sirvió de base para la rehabilitación del distrito de riego del valle de Juárez, integra un estudio de las aguas subterráneas que permitió evaluar la potencialidad de los acuíferos en el Valle de Juárez. Se elaboró un catálogo con la información de 721 pozos existentes en ese entonces; se tomaron lecturas piezométricas en el censo realizado en diciembre de 1969, además de contar con información anual de los niveles en algunos pozos desde 1958 a 1970. Se contó con información de 64 pruebas de bombeo, Se dispuso de los resultados de 331 análisis químicos del agua de pozos, como parte del estudio CIEPS perforó 39 pozos para observación de niveles freáticos; se contó además con estudios foto geohidrológico y geofísicos del valle de Juárez, realizados anteriormente Considerando los diversos usos a los que se destina el agua subterránea, se efectuó un cálculo de la extracción, obteniendo un valor medio de 144 millones de metros cúbicos anuales, los resultados de pruebas de bombeo de corta duración los valores de transmisividad variaron entre 0.001 y 0.072 m<sup>2</sup>/seg. Para la zona urbana de ciudad Juárez, se menciona que para el año de 1969 se tenían en operación 23 pozos con profundidades que varían entre 186 y 283 m y que extraían un volumen total de 27 Mm<sup>3</sup> además con una calidad de agua que variaba entre 360 a 850 ppm de sólidos totales disueltos. De la evolución de niveles estáticos entre 1967 y 1970, se obtienen abatimientos comprendidos entre 0.3 y 2m, predominando los valores mayores. El cálculo de la recarga a partir del balance de agua es de 16 Mm<sup>3</sup>, que excede a la extracción provocando una sobreexplotación del acuífero. Por último, para disponer de recursos hidráulicos adicionales, se recomienda ampliar las investigaciones geohidrológicas hacia la zona de terrazas además realizar estudios en la cuenca de Samalayuca.</p>	<p>1970</p>

Tabla 8 (Continuación) Estudios previos del Acuífero Bolsón del Hueco (Valle de Juárez) (CONAGUA 2008).

NOMBRE	TIPO	RESUMEN	AÑO
<p><b>U.S. Geological Survey</b> "Digital model for simulated effects of ground-water pumping in the Hueco Bolson, El Paso area, Texas, New Mexico, and Mexico "</p>	<p>Estudio</p>	<p>Un modelo digital de dos capas del Bolsón del hueco fue desarrollado para simular los cambios históricos en los niveles del agua y de las etapas de predesarrollo (1903), para predecir la respuesta del sistema hidrológico a cualquier proyecto de explotación del agua subterránea. El modelo mostró que una propuesta de explotación para el periodo de 1973-1991, en el cual el bombeo se incrementa en 29 % en la parte texana del bolsón y de 34 % en Cd. Juárez, puede provocar abatimientos adicionales de 13.7 m en la vecindad de El Paso y de 21.3 m en Cd. Juárez. El estudio también mostró que cerca del 60 % del agua proviene del almacenamiento del acuífero del bolsón. El modelo incluye una parte de la actual zona urbana y solo una pequeña parte de la zona agrícola en la porción mexicana del Bolsón del Hueco, aporta una idea clara del funcionamiento del sistema hidrológico y de la posición original del nivel estático en estado estacionario del acuífero.</p>	<p>1976</p>
<p><b>Texas Development of Water Resources</b> "Ground water development in the El Paso Region, Texas, with emphasis on the resources of the lower El Paso Valley."</p>	<p>Estudio</p>	<p>Los objetivos de la investigación fueron el de revisar, actualizar e incluir trabajos previos en el área de estudio y definir las áreas con agua subterránea de buena calidad. El estudio analizó el comportamiento de la calidad del agua subterránea en el acuífero somero, en la franja que se ha denominado Aluvión Río Grande, donde se ubican las mejores tierras para la agricultura. Tomando en cuenta estos factores se elaboraron los planos donde se definen las zonas con agua subterránea con contenido menor a 2000 ppm de sólidos disueltos, relacionándola con las áreas de los suelos más aptos para la agricultura, recomendando de esta forma las mejores zonas para un mejor uso y aprovechamiento del agua subterránea de la región.</p>	<p>1980</p>
<p><b>Junta Municipal de Aguas y Saneamiento</b> "Diagnóstico de explotación del acuífero de la zona urbana de Cd. Juárez, Chih."</p>	<p>Diagnóstico</p>	<p>Con este diagnóstico se hace un análisis de la evolución de los niveles piezométricos del sistema acuífero de la zona urbana y la primera unidad del Distrito de Riego, a fin de definir el modelo conceptual de funcionamiento y grado de explotación desde el punto de vista cualitativo, como un paso previo para detectar deficiencias de información y tener bases para realizar programas de trabajos de campo y de recopilación de información en otras dependencias, con miras a contar con toda la información necesaria para hacer una simulación matemática del flujo subterráneo. La información y conclusiones derivadas de este diagnóstico permiten tener una idea clara de lo que se puede encontrar en el área de estudio, dado que el "Estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de la Red de Observación del Acuífero de Cd. Juárez, Chih.", es su continuación y los parámetros hidráulicos deben ser muy semejantes, ya que el documento elaborado por la JMAS, hace el análisis de la evolución del sistema acuífero en el área correspondiente a la zona urbana y Primera Unidad del Distrito de Riego 009 y el estudio motivo del presente documento incluye las unidades Segunda y Tercera del Distrito, con lo que se incluye la totalidad de la zona denominada Valle de Juárez.</p>	<p>1995</p>

Tabla 8 (Continuación) Estudios previos del Acuífero Bolsón del Hueco (Valle de Juárez)  
(CONAGUA, 2008).

NOMBRE	TIPO	RESUMEN	AÑO
Junta Municipal de Aguas y Saneamiento "Modelo Matemático del Valle de Juárez (Zona Conurbada de Cd. Juárez). Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Cd. Juárez Chih."	Estudio	El área de estudio cubre la zona urbana de Ciudad Juárez y parte de la del Paso, Texas, delimitando un área de aproximadamente 395 km <sup>2</sup> regionalmente el acuífero está alojado en los sedimentos que se fueron depositando en la depresión formada por un sistema de fallas normales, donde los bloques caídos provocaron la conformación de una depresión asimétrica y los bloques levantados son las actuales barreras que limitan la cuenca del río bravo. Las rocas fracturadas de las sierras que bordean el acuífero al acuífero, aunque pueden llegar a tener agua, se consideran en general transmisoras del agua de recarga que fluye hacia los sedimentos de los depósitos que rellenaron el bolsón. El modelo se realizó mediante el código Mod Flow; el área de estudio se discretizó en una malla de 46 por 46 celdas de 500 m de ancho cada una; verticalmente se discretizó en tres capas, una para cada acuífero y una para el conjunto de estratos semiconfinantes. Se calibró el modelo con un estado estacionario para 1903 y para el periodo transitorio de 1903 a 1995. Como conclusión importante se obtiene para la zona mexicana del área del modelo una recarga anual de 78 Mm <sup>3</sup> y una extracción de 159 Mm <sup>3</sup> , que provocan un déficit en el almacenamiento de 81.8 Mm <sup>3</sup> anuales. Entre las recomendaciones se sugiere el cierre de algunos pozos por etapas en un plazo de cinco años, mencionando específicamente cada uno de ellos. También se recomienda iniciar negociaciones para cambiar el uso del agua del Tratado de 1906 de agrícola a agua potable, así como realizar estudios de prospección hidrogeológica en la zona de Terrazas, al sureste de Cd. Juárez y en la zona de La Candelaria, al sur de los médanos de Samalayuca.	1995
<b>Hidrosistemas Universales, S.A.</b> de C.V. contrato GAS-07-PRO96 para Comisión Nacional del Agua. "Estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño óptimo de las Redes de Observación de los Acuíferos de Caborca, Son., Cd. Juárez Chih. y Cd. Delicias Chih. (2. Acuífero de Cd. Juárez, Chih.)"	Estudio	Tuvo como objetivos además de conocer el geometría, parámetros hidráulicos y funcionamiento hidrodinámico del acuífero del valle de Juárez, elaborar un modelo matemático del sistema, predecir el comportamiento para varios escenarios de explotación y definir una red óptima de monitoreo. El área de estudio comprendió una franja de forma irregular ubicada entre las faldas de las sierras Presidio, Guadalupe, San Ignacio y La Esperanza y el río Bravo con un ancho que varía entre 8 y 14 km. No comprende el área de estudio la zona urbana de Ciudad Juárez. De la información piezométrica, se concluye que la profundidad de los niveles de agua ha sufrido recientemente poca variación, presentando profundidades comprendidas entre menos de un metro y 30 m con dirección general de flujo de noroeste a sureste en forma paralela al río hasta la zona de Guadalupe donde un cambio en la dirección del flujo evidencia una recarga del río Bravo hacia el acuífero. Concluye el estudio que el modelo conceptual del sistema acuífero del valle de Juárez está constituido por dos unidades hidrogeológicas, una que funciona como libre y otra como semiconfinada bajo la franja donde se presenta el estrato arcilloso y libre fuera de ésta. Esta última unidad semiconfinada desaparece debido a la presencia de un potente estrato, comportándose como libre fuera de este estrato.	1996
<b>Junta Municipal de Agua y Saneamiento</b> "Modelo matemático de simulación hidrodinámica del acuífero de la zona urbana de Cd. Juárez, Chih."	Estudio	Se desarrolla un modelo de simulación de flujo de agua subterránea, cubriendo básicamente la zona urbana de Cd. Juárez y la primera unidad del distrito de riego 009. El objetivo del estudio es desarrollar una herramienta técnica para evaluar la situación geohidrológica actual y el probable comportamiento a futuro del acuífero del Bolsón del Hueco en esta zona, y con ello promover medidas para su mejor administración. Se menciona que desde 1975 a 1975, se ha venido generando un cono de abatimiento en la zona urbana, con su máxima depresión en el área centro de la ciudad, y se estima un promedio de 1.25 m de abatimiento por año en este periodo. Se obtuvo una recarga anual de 96.41 Mm <sup>3</sup> /año y una extracción de 179.89 Mm <sup>3</sup> /año. Se propone el cierre gradual de 30 pozos con mala calidad de agua ubicados en la zona centro de la ciudad, y tratar de suplir ese volumen con una fuente diferente al acuífero actual, y se sugiere el intercambio de agua del tratado de 1906 por agua tratada con el distrito de riego.	1998

Tabla 8 (Continuación) Estudios previos del Acuífero Bolsón del Hueco (Valle de Juárez) (CONAGUA, 2008).

NOMBRE	TIPO	RESUMEN	AÑO
Base de Datos Binacional del Acuífero Transfronterizo, Cd. Juárez/El Paso. Sección Mexicana de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), Comisión Nacional del Agua (CNA), Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Cd. Juárez (JMAS).	Estudio	Este documento integra en una sola base de datos la información oficial, sobre las aguas subterráneas de la zona de Cd. Juárez-El Paso, proporcionada por México y Estados Unidos, se elabora en forma conjunta en el marco de los acuerdos de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), a través de un grupo técnico binacional integrado por autoridades de ambos países relacionados con la materia, en el que participaron por México, la Comisión Nacional del Agua, la Junta municipal de Agua y Saneamiento y la Sección Mexicana de CILA. Desde 1940 se han presentado abatimientos de más de 45 metros en las áreas de mayor explotación del acuífero del acuífero Hueco-Tularosa. Los conos de depresión generados por el bombeo en las zonas de pozos municipales constituyen los puntos de abatimiento crítico. La mayoría de los abatimientos próximos a las zonas de mayor concentración de pozos municipales varían entre 15 y 30 metros. Los conos de abatimiento municipales subyacen las ciudades de Juárez y El Paso. La recarga al acuífero del río Bravo a lo largo de las zonas de riego, se genera primordialmente por la infiltración de aguas superficiales que han sido aplicadas a los cultivos. La recarga también es provocada por las infiltraciones directas de los canales de derivación y cauces del río y arroyos. Otras fuentes de recarga al aluvión del Río Bravo incluyen la precipitación directa en la superficie de la planicie de inundación, las fugas de los sistemas de agua potable, la infiltración proveniente de drenes y canales de riego, la infiltración de los escurrimientos a lo largo de los arroyos y la recarga de formaciones que generan flujo transversal y vertical ascendente en el Bolsón del Hueco.	1999
Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Juárez. "Estudio de prospección geofísica en la zona de Terrazas."	Estudio	Mediante este estudio se definió las unidades geoelectricas del subsuelo a partir de la interpretación de sondeos eléctricos verticales realizados para este trabajo y de otros sondeos realizados con anterioridad. El estudio delimito una zona de aproximadamente 100 km <sup>2</sup> con condiciones favorables para la realización de perforaciones exploratorias con la finalidad de determinar la posibilidad de extracción de agua subterránea para el abastecimiento de desarrollos habitacionales construidos posteriormente en la zona.	2000
Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Juárez "Recorridos de piezometría en El Valle de Juárez."	Estudio	En el 2001 la JMAS, realizó un recorrido de piezometría del Valle de Juárez. De acuerdo con el informe se visitaron un total de 190 pozos en todo el valle, de los cuales 51 no tenían identificación. En base a la información existente y a la recopilada durante los recorridos se realizaron planos de profundidad (2001), elevaciones (1981, 1990 y 2001) y evoluciones del nivel estático (1981-1990, 1990-2001 y 1981-2001). Para el periodo de evolución más largo, se tiene que la mayor parte del área se presentan recuperaciones, con valores máximos de hasta 7 metros localizados al suroeste de Colonia Esperanza y abatimientos superiores a 10 metros al sureste de Ciudad Juárez, debido a las elevadas extracciones del organismo operador para abastecimiento público urbano.	2001

Tabla 8 (Continuación) Estudios previos del Acuífero Bolsón del Hueco (Valle de Juárez) (CONAGUA, 2008).

NOMBRE	TIPO	RESUMEN	AÑO
Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Juárez "Estudio Geohidrológico en la cuenca del Arroyo Las Bandejas."	Estudio	Para la elaboración del estudio geohidrológico en la Cuenca del Bandejas se realizaron un total de 38 sondeos eléctricos verticales, además de fotointerpretación y reconocimientos geológicos en campo, previo análisis de la información existente por parte del área de Geohidrología de la JMÁS. Los trabajos anteriores en esta área se reducen a la edición de las cartas geológicas escala 1:250000 de INEGI y del Consejo de Recursos Minerales y al informe preliminar de la carta geológico-minera Juárez-Porvenir del Consejo de Recursos Minerales. Los resultados de análisis fisicoquímico y de metales pesados realizados a siete aprovechamientos indican valores fuera de norma para el flúor, fierro, sodio, sulfatos y sales disueltas. Las altas concentraciones de fierro se asocian a la disolución del material del ademe y las de sulfato a la presencia de yeso en la zona. En base a las configuraciones del nivel estático se identificaron cuatro zonas de recarga en el acuífero, correspondientes al área entre los arroyos La Boquilla y La Máquina, al sur de la Sierra Presidio, la Sierra San Ignacio y la Sierra La Amargosa. La salida de flujos de agua subterráneas se ubica entre la parte norte de la sierra San Ignacio y el sur de la Sierra Guadalupe. El cálculo del almacenamiento y vida útil del acuífero se elaboró únicamente para el espesor saturado del medio granular tomando en consideración los valores más bajos de cada parámetro, dando como resultado una vida útil de 10.7 años emplazando una batería de 20 pozos con extracciones de 25 lps cada aprovechamiento.	2003
Junta Municipal de Aguas y Saneamiento "Análisis de la Demanda de Agua Potable y del Comportamiento Hidráulico del Acuífero Valle de Juárez en el área que abastece a la Ciudad."	Estudio	En los antecedentes de este documento se menciona que Ciudad Juárez por su ubicación geográfica carece de escurrimientos superficiales que pudieran ser utilizados como fuente de abastecimiento de agua potable, ya que el caudal del río Bravo, compartido con los Estados Unidos, se destina a la agricultura. Por esta circunstancia se utiliza el almacenamiento de agua en el subsuelo para el abastecimiento de agua potable de la población, el almacenamiento subterráneo conocido como acuífero del Bolsón del Hueco, es compartido con la población de El Paso, Texas y se menciona que sobre la base de estudios realizados el acuífero se encuentra en etapa de sobreexplotación. Se hace una proyección del crecimiento de la población de Ciudad Juárez en el periodo de 2000 a 2015 y se, calcula el volumen anual para cubrir la demanda de agua potable, considerando una dotación de 310 l/h/d hasta 2010 y de 300 l/h/d a partir de ese año. Así se requiere un volumen de extracción en agua subterránea de 246,236 Mm <sup>3</sup> en el año 2015 para una población de 2,248,734 habitantes. En 1998 se inicia un programa de perforación de 23 pozos en la zona urbana de la Ciudad, que inician su operación gradualmente a partir del año 2000; esta actividad se ve reflejada en la configuración del año 2004, donde se aprecia que no todo el flujo se dirige en forma radial hacia el centro, sino que, en la parte sureste, donde se ubican los nuevos pozos, se indujo un importante flujo. Se concluye que no es conveniente seguir incrementando el volumen de extracción, sino disminuirlo sobre todo en la zona centro donde los abatimientos están provocando un deterioro de la calidad del agua considerable.	2005

Todos los estudios mencionados anteriormente no están disponibles para consulta por ser considerados como documentos internos de la descentralizada que los realizo por lo que únicamente se cuenta con los resúmenes no muy extensos, de los hallazgos y resultado en algunos casos muy interesante, como el estudio de 1970 realizado por la Secretaria de

Recursos Hidráulicos "Estudio para la Rehabilitación del Distrito de Riego del Valle de Juárez, Chih." C.I.E.P.S., s.c. Ingenieros Consultores y Proyectistas. En el cual se hace un análisis muy detallado del Distrito de Riego 009 del Valle de Juárez, de las aguas subterráneas que permitió evaluar la potencialidad de los acuíferos en el Valle de Juárez, para la zona urbana de Ciudad Juárez, se menciona que para el año de 1969 se tenían en operación 23 pozos con profundidades que varían entre 186 y 283 m y que extraían un volumen total de 27 Mm<sup>3</sup> con una calidad de agua que variaba entre 360 a 850 ppm. de sólidos totales disueltos. De la evolución de niveles estáticos entre 1967 y 1970, se obtienen abatimientos comprendidos entre 0.3 y 2 m, predominando los valores mayores. El cálculo de la recarga a partir del balance de agua es de 16 Mm<sup>3</sup>, que excede a la extracción provocando una sobreexplotación, lo que es evidente desde que año el acuífero Valle de Juárez está en problemas.

## **1.9 Marco Teórico**

### **1.9.1 La planeación y el desarrollo urbano**

El desarrollo urbano y su planeación, establece a grandes rasgos las proporciones básicas del desarrollo y el crecimiento de una ciudad. En los últimos años estos temas han cobrado un interés inusitado, principalmente en lo político por presiones que ejerce la población, principalmente por las estrategias que han ido fracasando ante la expansión de la ciudad que trae como consecuencia una serie de problemas de índole social y ambiental.

### **1.9.2 La Planeación urbana y Medio ambiente**

Los antecedentes de la planeación urbana y su relación con el medio ambiente como parte integral de ésta como una forma de sostenibilidad de la calidad de vida, tiene una diversidad de orígenes que se explican desde la discusión teórica de la sociología y ecología urbanas del siglo XIX. El hecho de que en el concepto del medio ambiente y su valoración exista un

conflicto de objetividad y retórica, dificultó durante décadas su incursión en su uso discursivo y político por parte de instituciones y gobiernos, y que, hasta la fecha, sea un tema polémico y estratégico por los diferentes intereses que manejan los distintos actores involucrados. Aún con estas dificultades, el medio ambiente se ha convertido en un requisito indispensable al concepto actual de Ciudad (García, 2008).

El marco teórico general para explicar la sociedad en las ciencias sociales del siglo XIX fue importado de las ciencias naturales. Las discusiones en torno a la objetividad subjetividad, tenían que ver con el significado de estas nociones en estas disciplinas, Marx en diferentes trabajos intento explicar a la sociedad como un producto de las fuerzas sociales, intencionalmente evitando explicaciones naturalistas del funcionamiento social. Para él, la evolución de la sociedad como el resultado de la dinámica del desarrollo de las fuerzas productivas y de las relaciones de producción, siendo las primeras motrices de la historia. Pero es ahí precisamente donde algunos pensadores sociales contemporáneos han encontrado los principales problemas de interpretación de la teoría marxista, particularmente en lo relativo tanto a su naturalismo, como a su falta de una reflexión sobre el daño ambiental provocado por el desarrollo de las fuerzas productivas en la sociedad moderna (Lezama, 1993).

Al analizar el surgimiento del discurso ambientalista y su influencia en el proceso de construcción de políticas Hajer (1995), también reconoce no sólo la naturaleza social del medio ambiente, sino también sus implicaciones para la toma de decisiones (Lezama, 1993).

Los problemas ambientales tienen un interés creciente en diferentes variantes del enfoque constructorista, Buttel (1987) hace mención en seis áreas de interés para la perspectiva sociológica ambiental, ecología humana, actitudes ambientales, riesgo tecnológico y valoración del riesgo, la economía del medio ambiente y la política del medio ambiente. El

autor señala que, para la sociología, el medio ambiente es un factor secundario mientras se aplica a la sociedad, y ese momento es a medida que las crisis ambientales emergen y afectan (García, 2008 en Buttel, 1987).

Según Eder (1996), la construcción social de los problemas ambientales en el que la relevancia o irrelevancia que adquieren no está tanto en función de la magnitud del daño que provocan, sino más bien de la manera en la que son internalizados por la sociedad en los ámbitos normativos, cognoscitivos y simbólicos.

Lezama (2004), menciona que el medio ambiente y el daño ambiental atraviesan por un proceso de valoración, filtración y construcción social, y este proceso de aceptación, de percepción y reconocimiento se da por medio de conocimientos de normas y de símbolos sociales.

En las bases conceptuales de la planeación de las ciudades, entendemos que el campo de estudio u objeto de atención de la planeación urbana, “es el proceso de configuración socioespacial, que surge de la relación compleja entre la sociedad y la naturaleza y las diversas formas y mecanismos de intervención para su transformación” (Iracheta, 1997).

El quehacer de la planificación y el urbanismo lo definen los elementos anteriores, lo esencial es reconocer que la configuración urbana es determinada por las relaciones sociales y el modo de producción y su relación con los recursos naturales y no sólo por el espacio físico (García 2008). En la Ley General de Asentamientos Humanos (Federal P. E. 1994) (Art. 1º) se le denomina Desarrollo Urbano al proceso de planeación y regulación de la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población. En esta misma ley, en el artículo 11 se especifica que la planeación y ordenamiento de los asentamientos humanos y desarrollo urbano forma parte de una política sectorial que coadyuva al logro de los objetivos de los planes nacional, estatal y municipal (ZOET, 2008).

En un nivel general, la planeación territorial pretende organizar la estructura espacial que resulta como producto de un determinado proceso de desarrollo económico-social y natural cualquiera sea el signo de la estrategia política que lo impulsa (UAM-A, 1986 e Iracheta, 1997).

Habitualmente se acostumbra a diferenciar los procesos de urbanización como crecimiento "urbano" y "urbanización". Urbano es un proceso espacial y demográfico y se refiere a la importancia creciente de las ciudades como concentraciones de población y recursos en un sistema económico y social determinado. Urbanización es un proceso espacial y son los cambios en el comportamiento y en las relaciones sociales que se producen en la sociedad como resultado de vivir un número creciente de población en las ciudades (Wirth, 1938).

La Ley General de Asentamientos Humanos, es base de la actual de la planeación vigente en México, misma que se expresa en los sistemas locales y regionales de regulación y planeación del desarrollo urbano.

### **1.9.3 Agua**

El agua no se distribuye de manera uniforme en el planeta, ocupa el 70% de la superficie terrestre. Si fuera una lámina uniforme cubriendo todo el planeta tendría una capa de 3000 metros de profundidad. Sin embargo, alrededor del 97.5% de esta agua está en los mares, los océanos y es salada, por lo que no se puede usarse para beber, para la agricultura, ni para la mayor parte de las actividades humanas. El 2.5% del agua restante es dulce pero casi toda ella está en los hielos de los polos, en los glaciares, en depósitos subterráneos o en otros lugares de difícil utilización. Por todo esto sólo un 0,003% de la masa total de agua del planeta es aprovechable para los usos humanos.

El agua sigue un ciclo de evaporación, precipitación, vuelta a los mares y océanos, por lo que se tiene una continua purificación. Por lo cual, si no la contaminamos o agotamos a un ritmo

mayor del que necesita para limpiarse o para recargar sus lugares de almacenamiento, tendremos un suministro continuo y accesible de agua de buena calidad. Lamentablemente, en muchas ocasiones se está perturbando el ciclo de renovación del agua. Por esta razón UNESCO, en la década de 1990, dejó de catalogar el agua como un recurso renovable. El agua en nuestro planeta es esencial para la supervivencia del ser humano, lo que permite a su vez vivir en sociedad. Es un hecho indiscutible que el vital líquido se encuentra amenazado no únicamente a nivel local sino a nivel global, principalmente en los países en vías de desarrollo esto se debe a un desarrollo urbano descontrolado y mal planeado, el uso indiscriminado de los recursos forestales y al cambio de usos de suelo principalmente de agrícola a urbano con esto las fuentes superficiales de agua se fueron acabando y con ello el uso del vital líquido para el consumo de la población reduciendo de manera enorme las fuentes de agua dulce (Salas-Platas, 2006).

Dentro de los recursos naturales el agua es uno de los principales y más importantes no se podría pensar una sociedad sin este vital recurso que está directamente desarrollado con la calidad de vida de las personas y es un pilar importante en el sistema económico, un desequilibrio importante derivado del crecimiento económico y demográfico sería la escasez del agua potable (Padrón et al., 2009).

#### **1.9.4 Disponibilidad Hídrica**

Se tiene estimado que la población mundial tenga un crecimiento de unos 80 millones de personas al año (USCB, 2012). El aumento de crecimiento demográfico en las ciudades, la urbanización, la industrialización cada vez mayor y el aumento de la producción en el campo han generado una demanda de agua dulce cada vez mayor. Se tiene planificado que para el año del 2030 en todo el mundo tendremos un déficit del 40% de agua en un escenario climático en que todo sigue igual (2030 WRG, 2009).

La cuestión es que hay agua suficiente como para satisfacer las necesidades crecientes del mundo, pero no si no cambiamos radicalmente el modo en que se usa, se maneja y se comparte el agua. En el mundo hay alrededor de 263 cuencas transfronterizas, 158 carecen de cualquier tipo de marco de gestión cooperativa (UNEP, 2002). Por lo menos al 50% de la población mundial se abastecen de aguas subterráneas que es agua potable lo que representan el 43% de toda el agua utilizada para el riego (FAO, 2010).

A nivel mundial, 2.500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos de aguas subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas diarias de agua (UNESCO, 2012). Se estima que el 20% de los acuíferos mundiales está siendo sobreexplotado (Gleeson et al., 2012). La disponibilidad de agua se enfrenta a las presiones de la contaminación, por eso se recalca que en las últimas décadas la población mundial se triplicado, y en consecuencia también extracciones de agua, es por esta razón que hay una gran presión sobre recurso hídrico. La disponibilidad de agua, principalmente la subterránea es un problema que se está agravando en el mundo por muchas razones, pero las principales son la falta de buenos sistemas de planeación urbana sustentable que se enfoque a la satisfacción de la población sin agotar este recurso fundamental para la vida y minimizar los costos del medio ambiente para las poblaciones futuras. Uno de los grandes problemas que se afrontaran en el siglo XXI será la disponibilidad de agua dulce y limpia, dado que el cambio climático, el crecimiento poblacional y el desarrollo económico ejercen cada vez más presión sobre este recurso (Kidd, 2002; FAO, 2007).

Los responsables de la gestión de este recurso el máximo rector del agua en México (CONAGUA) en estudios recientes mostro un panorama no muy esperanzador sobre la calidad y cantidad del agua subterránea, y el insuficiente avance del conocimiento científico y técnico (Chávez et al., 2006). El diagnóstico fue el siguiente: de 32 acuíferos sobreexplotados en

1975 se pasó a 104 en 2006, en tres décadas aumentó tres veces el número en donde la extracción fue mayor a la recarga natural. En los que se encuentra el estado de chihuahua con serios problemas de agua. El agua subterránea y su importancia radica en que es la fuente que sostiene el riego de dos millones de hectáreas y además abastece cerca de 70% del volumen de agua que requieren las ciudades y en donde se concentran 60 millones de habitantes, abastece también a las instalaciones industriales y a casi la totalidad de la demanda de agua de la población rural (Aboites et al., 2010).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) puso a disposición el diagnóstico de la disponibilidad de agua subterránea de 212 acuíferos y los publicó en el *Diario Oficial de la Federación*. En la valoración se encuentran los acuíferos más importantes, en el estudio están tanto los sobreexplotados como los que tienen una gran disponibilidad de agua y representan la tercera parte del total, por lo cual en ellos se concentra 87% del volumen de agua subterránea extraída del subsuelo a nivel nacional. De total de estos acuíferos, 108 tienen una disponibilidad de 18,000 Mm<sup>3</sup> al año, mientras que los 104 restantes tienen un déficit de -4,494 Mm<sup>3</sup> al año (Aboites et al., 2010).

Al final se diagnosticó que el conocimiento que se tiene de los acuíferos más importantes es aceptable para fines de administración del agua, pero insuficiente para orientar un manejo más flexible y complejo, requerido para conciliar la preservación de los acuíferos con las crecientes demandas. También se determina que los ordenamientos legales en materia de agua son insuficientes o inadecuados para una gestión eficaz del agua subterránea: en su mayoría, las vedas son inoperantes e incompatibles con las condiciones actuales de explotación de los acuíferos (Carrillo et al., 2005).

Un pronóstico que se tiene a nivel mundial es que el norte y centro de México será una de las regiones con mayor escasez de agua en los próximos 25 años (Vorosmarty et al. 2000), ya

que para el año 2025 se estima que el agua disponible por habitante/año se reducirá en un 30% (Lacoste, 2003).

La disponibilidad natural media de agua (DNMA) por habitante/año era de 1,212 m<sup>3</sup>, para el norte de México, en el 2005, clasificada como “muy baja”, por lo que la presión del recurso hídrico es catalogó como “fuerte”. La estimación que se tiene sobre la disponibilidad de agua per cápita será de 907 m<sup>3</sup>; disminuyendo en 45%, en promedio, para el año 2005 al 2030 el año 2030 la DNMA, esto es clasificado como “escasez grave” (CNA, 2006, 2010).

En el estado de Chihuahua el uso del agua tanto de pozos, presas y ríos es usada de una forma irresponsable e irracional por lo que le estado se encuentra con “problemas severos de escasez, sobreexplotación y contaminación de agua” (CNA, 1997, 2006). “Ya en el año 2008 la entidad tenía un 35% menos de agua renovable necesaria per cápita, lo cual la clasifica como “región en estrés hídrico” (CNA, 2010). La estimación que se tiene a futuro para los años de 1995 al 2020 el estado de Chihuahua y su población, tendrá un incremento en el orden del 34-40%, llegando a 3’674,000 habitantes (CNP, 2010), y el consumo promedio de agua de la población sería de 300 L/día/persona (CNA, 2007). Con estos datos de incremento de la población de la entidad requeriría por lo menos la enorme cantidad de 401’200,800 m<sup>3</sup> agua/año.

*“El acuífero bolsón del Hueco que comparten Ciudad Juárez-El Paso sostiene a más de 1.5 millones de personas y si el ritmo actual de extracción continúa se pronostica su agotamiento para el año 2025” (Kidd, 2002).*

### **1.9.5 Desarrollo urbano y su relación hídrica**

Tanto el desarrollo industrial como el incremento poblacional en áreas urbanas resultan en problemas de calidad y cantidad de las aguas subterráneas en el mundo (Grisczek et al.,

1996). La excesiva urbanización tiene un efecto importante en la disponibilidad del agua así también como su calidad, lo cual tiene importantes implicaciones sociales, ambientales, económicas y políticas (Vázquez-Suñé et al., 1999).

Los diferentes estudios sobre el desarrollo urbano indica que las infraestructuras urbanas nos plantean una serie de complejidades, en los diversos niveles de desarrollo que presentan los factores que *“condicionan el crecimiento y calidad de vida de cada ciudad y las formas que adquieren las relaciones que se establecen entre estos factores y el desarrollo de cada espacio urbano”* (Correa y Rozas, 2006).

El desarrollo urbano ha tenido a lo largo de la historia de las sociedades algo en común que es el incremento en la demanda del agua lo que ha repercutido un aumento progresivo de la presión y por ende una mayor explotación de los recursos hídricos que, en el último siglo, ha llegado a un punto de insostenibilidad por la falta de equilibrio entre la utilización del recurso natural y su capacidad de regeneración es mayor la explotación que la recarga (Alberich, 2007).

Una de las causas primordiales de esta demanda de agua está ligada directamente crecimiento de la población, Tal es el caso de algunas ciudades de América del Norte por su acelerado crecimiento de la población es una fuente de presión en los recursos acuíferos, sobre todo en las zonas de rápido crecimiento del “cinturón del sol” y en la región fronteriza entre EU y México, ya tienen un serio problema escasez de agua. La población en la región fronteriza entre México y EU su crecimiento es constante más en la parte mexicana que la de EU y se espera que sea constante en los próximos 20 años (U.S.- Mexico Foundation for Science, 1998).

La población de las ciudades gemelas de El Paso, Texas, y Ciudad Juárez, Chihuahua, de 1940 a 1995 aumentó 3 y 19 veces respectivamente, aumentando la demanda de agua que

amenaza con agotar los acuíferos del área en 2025 (Hume, 2000). El desarrollo urbano va de la mano con el recurso del agua, la ciudad por sus características de desierto básicamente se surte de agua subterránea mediante pozos que se extrae del acuífero denominado Bolsón del Hueco, de donde se estima un consumo promedio de 330 litros por habitante, con una cobertura del orden del 92% (COCEF, 1999). “Se calcula que la población total de México ascienda a 125 millones en 2025, generando “presiones en el agua” en ciertas zonas” (World Water Vision, 2000).

#### **1.9.6 Acuíferos y su disponibilidad**

Los acuíferos son las únicas fuentes de agua en las regiones áridas y semiáridas, que ocupan alrededor del 50% del territorio nacional. Y son explotados para el riego de aproximadamente dos millones de hectáreas (que representa poco más de la tercera parte de la superficie de riego en el país). Suministran cerca del 75% del volumen de agua utilizado en las ciudades principalmente las del norte por ser prácticamente su única fuente, donde se concentran alrededor de 65 millones de habitantes. Además de Abastecer las demandas hídricas de los desarrollos industriales, y satisfacer a la población rural (25 millones de habitantes), (CNA, 2010).

Localmente en la región, de las ciudades de Juárez y El Paso se abastecen de agua potable del acuífero conocido como Bolsón del Hueco. Sin embargo, el abastecimiento se establece en diferentes maneras. Así, pues de este Acuífero Ciudad Juárez obtiene el 90% para su consumo de agua potable y municipal que por muchos años fue su única fuente, pero últimamente se comienza a explotar agua del Bolsón de la Mesilla y aproximadamente el 85% para uso agrícola. En cuanto a la ciudad de El Paso, esta ciudad extrae del Bolsón del Hueco aproximadamente el 47%; el 20% proviene del Bolsón de la Mesilla y 33% de aguas

del Río Bravo. Para uso agrícola, se utilizan las aguas del el Río Bravo en su totalidad (Rincón et al., 2005).

Desde su fundación prácticamente las aguas de Bolsón del Hueco han mantenido el crecimiento de esta región del Paso del Norte. Sin embargo, el intenso incremento de la población principalmente la de Ciudad Juárez están originando que las tasas de extracción exceden en gran medida la tasa de recarga “*marcando drásticamente una condición de uso no sustentable del recurso hídrico*” (Hibbs et al., 2002) estudios revelan que la tasa de extracción es casi 2 veces mayor que la tasa de recarga.

La JMAS cubre un área de extracción con una superficie de 3598.67 Km<sup>2</sup> (extensión aproximada a la mancha urbana de Ciudad Juárez), el acuífero de Bolsón del Hueco tiene una recarga anual de 35 Mm<sup>3</sup> anuales. “Esto significa que al menos en Ciudad Juárez la extracción supera en aproximadamente cinco veces la recarga estimada por concepto de precipitación” (JMAS, 2005). Sin embargo, el acuífero también recibe recargas subterráneas en un gradiente hidráulico norte–sur proveniente del lado estadounidense, mismas que no están debidamente cuantificadas. Es por esta razón que se requiere realizar un balance hidrológico para el acuífero Bolsón del Hueco considerando la totalidad de su área asentada en ambos países como el acuífero trasfronterizo que es.

### **1.9.7 Sustentabilidad Hídrica**

El principio fundamental de la sustentabilidad es satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. “*En el modelo económico actual, basado en la producción y el consumo y en el uso indiscriminado de los recursos naturales —en especial el agua— el costo ambiental ha superado al beneficio económico. Para revertir o remediar los daños ocasionados al ambiente es necesario partir de una visión sustentable*” (Sisto, 2010).

Para que recurso agua sea sustentable, se recomienda tener un buen manejo y planeación del recurso principalmente por las instituciones, el gobierno y la ciudadanía esto con el fin de optimizar sus usos. Por lo que se debe de crear todo un sistema que involucre la planeación, gestión, monitoreo y sistemas de información para mejorar su uso y aprovechamiento. *“La sustentabilidad del agua subterránea en las zonas semiáridas es una tarea difícil de lograr, debido a la excesiva explotación y a la recarga mínima de los acuíferos”* (Porrúa y Chávez, 2004).

*“el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades”* (ONU, 1987).

Los responsables y operadores de agua tienen una serie de desafíos ambientales, económicos, técnicos y administrativos, entre otros. Principalmente en el Norte de México, las áreas urbanas se han incrementado en un entorno de escasez de recursos hídricos que plantea serios problemas de sustentabilidad. *“En este contexto, el manejo de la demanda de los usuarios y de la oferta de los organismos operadores puede incidir en el equilibrio de las fuentes de abastecimiento, ya integradas a los sistemas municipales de agua, y contribuir a la sustentabilidad de los mismos.”* (Sisto, 2010).

En lo que respecta a las ciencias sociológicas plantean que las sociedades están en riesgo en las que los avances tecnológicos tales como las centrales nucleoelectricas, el transporte aéreo o la infraestructura hídrica, pueden colapsarse y con ello “comprometer el crecimiento de las generaciones actuales y futuras” (Ramos y Lorda, 2004). El Desarrollo Sustentable es un concepto que nos da certidumbre en estos tiempos de riesgo, un contexto de seguridad en tiempos de inseguridad nos provee la confianza en tiempos de malos manejos y toma de decisiones negligentes.

### **1.9.8 Desarrollo sustentable**

El término desarrollo Sustentable se viene desarrollando desde finales de los años cincuenta surge como una alternativa de desarrollo alterna a la ofrecida hasta entonces por los gobiernos, toda vez que era clasificado como deficiente; al revisarse las nociones sobre la sustentabilidad, por lo que al observar un aspecto común en estas es la mejora y mantenimiento, tanto de la calidad ambiental como de la satisfacción de las necesidades básicas de las generaciones actuales y futuras, objetivos que sólo pueden ser alcanzados a través de un mercado regulado y de un horizonte planteado a largo plazo con respecto a las políticas públicas urbanas (Rosales & Sánchez, 2015).

Hoy en día las discusiones políticas sobre el desarrollo sustentable están presentes, tanto a nivel local, estatal y/o regional, nacional o internacional, tanto como tema principal como relacionado a generación de energía, comercio, industria, ambiental, infraestructura, salud pública, entre otros. No obstante, hay que aclarar que no existe una definición consensuada y aceptada por todos para la sustentabilidad. “Por un lado esto puede ser visto como un aspecto negativo del concepto en función de la falta de precisión, pero por otro, otorga más flexibilidad, permitiendo que el término de la sustentabilidad pueda aplicarse en diferentes contextos sociales, económicos, políticos y éticos” (Gottschalk, 2013).

“Hace unas décadas prevalecía la idea de un mundo lleno de recursos inagotables; en la actualidad esta visión positiva se ha venido abajo. H. Daly lo plantea con toda claridad cuando percibe que la economía humana ha pasado de una era en la que la acumulación del capital (capital hecho por el hombre) era el factor que limitaba el desarrollo económico, a otra en la que el factor limitante es lo que resta del capital natural. Según la lógica económica se debería de maximizar la productividad de este factor cada día más escaso y tratar de

aumentar su disponibilidad. Por ende, la política económica debería de ser diseñada para incrementar el capital natural y su volumen” (Verdejo, 2000).

Para cualquier economía y sociedad en conjunto el agua es y será parte fundamental, por lo tanto, su manejo sustentable es una condición necesaria para tener una economía y una sociedad sin problemas de sustentabilidad “Aunque el concepto de *sustentabilidad* puede tener varios significados para la sociedad y sus instituciones” (Loucks y Gladwell, 1999). Por lo que señala la *sustentabilidad* como un concepto unificador el cual hace énfasis en la necesidad de considerar el futuro a largo plazo tanto como el presente.

Es por eso por lo que se basa en conceptos generales de *sustentabilidad*, y define al uso sustentable del agua como “*el uso de agua que permite sostener a una sociedad para que perdure y se desarrolle en un futuro indefinido sin alterar la integridad del ciclo hidrológico y de los ecosistemas que dependen de él*” (Gleick et al., 1996). El concepto siguiente es difícil o imposible de alcanzar en la práctica. Sin embargo, el recurso agua puede ser considerado sustentable si todos de alguna forma contribuimos para diseñar y manejar una mejor gestión del recurso y no permitir que las acciones de la depredación humana afecten las tasas de renovabilidad de las fuentes acuíferas y superficiales.

Un componente esencial en materia de sustentabilidad es el uso del agua con una explotación equilibrada de los recursos subterráneos y superficiales de agua dentro de una región hidrológica cuyos límites y potenciales pueden ser técnicamente conocidos. De acuerdo con la OECD (1998), en su documento titulado *Towards Sustainable Development*, el hecho de relacionar extracción de agua *versus* su tasa de renovabilidad es un punto central.

Es indispensable y necesario hacer balances hídricos para poder determinar cuánta agua podemos extraer de forma segura y sustentable a costa de su renovación por medio de recarga ya sea natural o indirecta en un periodo dado en relación con el volumen total disponible al

principio y al final del periodo establecido. “el desarrollo sustentable es una coevolución entre el ser humano y sus sistemas naturales, por lo que en materia del uso sustentable del agua podemos considerar que los elementos son la sociedad y el recurso hídrico” (Bossel,1999).

### **1.9.9 Desarrollo Urbano y su relación con las aguas subterráneas**

El agua es esencial para los procesos de urbanización de una ciudad, como lo es también para el desarrollo económico y la salud de sus habitantes (Foster et al., 2001; Al-Sefry y Sen, 2006; Shen, 2008). En las zonas urbanas las aguas del subsuelo son casi siempre el primer recurso que se utiliza con fines de abastecimiento de agua potable, porque tienen una serie de requisitos y/o beneficios como lo son su calidad son más seguras en época de sequías; se pueden utilizar tanto para el abastecimiento público y privado, son por estas razones contribuyen al desarrollo integral de las ciudades (Foster et al., 2001; Kuroda y Fukushi, 2008).

Con la explotación de las aguas subterráneas el sector industrial estimula el crecimiento poblacional lo que a su vez promueve el crecimiento urbano, originando una serie de subproductos de desecho, principalmente de las actividades humanas, la mayor parte de la eliminación de estos subproductos se hace mediante rellenos sanitarios o vertederos a cielo abierto que producen lixiviados que se infiltran en el terreno, los cuales pueden tener un grave impacto en la calidad del agua subterránea destinada principalmente para el consumo humano (Foster *et al.*, 2001). Es por esto factores una de las causas del crecimiento poblacional, “una realidad de los países en desarrollo donde las inmigraciones poblacionales inesperadas hacia los centros urbanos incrementan la presión sobre las aguas subterráneas y los servicios municipales de una manera sin precedentes en la historia de la humanidad (Ribeiro, 2002).

El desarrollo urbano afecta notablemente al ciclo hidrológico y que el principal factor que lo altera de forma significativa es el proceso de urbanización, que desarrolla la ciudad en varias etapas, pero cada etapa afecta de manera diferente al acuífero. Principalmente lo afecta por los procesos de impermeabilización de las superficies de rodamiento y estacionamientos, principalmente en lo referente a la recarga. Produciéndose una recarga indirecta diferente a la recarga en zonas rurales.

“Actualmente, se tiene menos experiencia sobre la recarga en áreas urbanas y la existencia de diferentes fuentes de recarga como puede ser: infiltración en grietas, sumideros de agua pluvial, filtración de pozos negros, estanques, letrinas y red de alcantarillado y fugas del sistema de suministro, complican el escenario para determinar un volumen aproximado a la realidad” (Dávila & Gómez, 2011).

En México la problemática, no se consideraron durante la planeación y crecimiento de los centros urbanos los escenarios futuros de su desarrollo. Los conceptos, metodologías y experiencias sobre medidas de prevención y mitigación de impactos relacionados a las aguas subterráneas deben ser analizados aplicando la hidrogeología urbana como parte integral de la gestión ambiental en áreas urbanas. (Dávila & Gómez, 2011).

### **1.10 Hipótesis**

La ampliación de la mancha urbana a través del tiempo ha tenido efectos en la dirección de los flujos de agua subterránea direccionando los mismos hacia las zonas de mayor explotación/ desarrollo urbano, generando abatimiento puntual lo que reduce la disponibilidad del recurso en ciertas zonas de la ciudad. De tal forma que, la modelación matemática del acuífero y la proyección futura del desarrollo urbano de Ciudad Juárez permitirán evaluar una prospectiva de sustentabilidad hídrica subterránea en los planes futuros de desarrollo urbano.

### **1.11 Objetivo General**

El objetivo principal de esta investigación es entender y modelar los impactos de la ampliación de la mancha urbana sobre la direccionalidad de los flujos subterráneos.

### **1.12 Objetivos particulares**

- Caracterizar el proceso de ampliación de la mancha urbana en el tiempo y modelarlo a futuro (2030).
- Modelar matemáticamente a futuro la dirección de los flujos subterráneos a partir de la predicción de la ampliación espacial de la mancha urbana.
- Caracterizar las direcciones de flujo subterráneo para la zona de estudio en el tiempo y modelarlo a futuro (2030).
- Buscar la relación existente entre la ampliación espacial de la mancha urbana y la dirección de flujos subterráneos para cada año propuesto.

### **1.13 Justificación**

A pesar de que el agua subterránea ha ido ocupando espacios en el desarrollo de la sociedad, las características propias, su disponibilidad, su almacenamiento poco visible a la población, así como una apreciación social de este recurso como bien de libre acceso, y la incipiente planificación hidráulica en la materia han dejado a los particulares la responsabilidad del aprovechamiento de fuentes subterráneas. En poco más de cincuenta años su disponibilidad ha disminuido a tal grado que ya se considera como un recurso escaso y sobreexplotado.

Existe una vasta literatura que informa sobre la situación hidrológica del agua subterránea en el mundo, no así de estudios que abordan el fenómeno en México y menos desde una perspectiva social, a pesar de que el abasto de agua está relacionado con el uso, la disponibilidad y la gestión de esta para llegar a una distribución equitativa del líquido y que de él depende la sociedad para subsistir.

En los últimos años se ha visto como la problemática ligada a las aguas subterráneas es muy similar en una gran cantidad de ciudades repartidas por el mundo, la rápida (y en algunos casos acelerada) urbanización afecta tanto a la disponibilidad del agua como a su calidad, lo cual tiene importantes implicaciones sociales, ambientales, económicas y políticas.

La Región Paso del Norte y principalmente Ciudad Juárez Chih. enfrenta una grave situación por deterioro y escasez del recurso agua, existe una necesidad impostergable de buscar nuevos mecanismos que permitan reducir la presión sobre los Acuíferos Valle de Juárez y Conejos Médanos con criterios de sustentabilidad. Dada su importancia estratégica, en el crecimiento y desarrollo de Ciudad Juárez que requiere garantizar el abasto de agua de calidad en el largo plazo (JMAS, 2012).

El agua es objeto de demanda, por ser un recurso imprescindible para la vida y la satisfacción de necesidades domésticas, urbanas, de riego, de producción de energía, de usos industriales, etc. Las características de aridez de esta región, aunadas a un gran crecimiento poblacional cercano a los 1,391,180 habitantes para Ciudad Juárez Chih. hacen que el agua sea un factor limitante para el desarrollo. Aunado a la población de los municipios de Guadalupe con 5272 hab. y Práxedes G. Guerrero con 5486 hab., es por lo anterior que debemos conocer su manejo en términos de un marco de desarrollo sustentable, lo que ya es apremiante.

Con la evaluación de la disponibilidad de este recurso y un desarrollo urbano sustentable, donde se tengan plasmados en los mismos planes urbanos, los estudios de disponibilidad en las zonas urbanas y como se mueven los flujos de agua subterráneas para que con ello se tengan elementos para orientar el crecimiento espacial de la ciudad, incorporando en ellos una perspectiva de sustentabilidad hídrica subterránea, con ello se logrará en el largo y mediano plazo la sostenibilidad social e institucional que se obtiene como resultado de la disminución de conflictos y del mejoramiento en la calidad de vida de las personas.

El manejo eficiente y racional del agua del acuífero Valle de Juárez (Bolsón del Hueco) requiere en algunos casos de la utilización conjunta de recursos superficiales y subterráneos, lo cual es un elemento clave para el manejo eficiente del agua. Un estudio reciente indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones para nuevos pozos, por el contrario, el déficit es de 86 500,987 m<sup>3</sup> anuales que se están extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero.

Uno de los retos que se presentan en la región, para solucionar los graves daños ocasionados por la sobreexplotación del acuífero, es adecuar el desarrollo sustentable de la región a la disponibilidad de agua. En la figura 35 se puede apreciar la grave problemática de Ciudad Juárez por la falta de disponibilidad del agua, primeramente el comportamiento del rendimiento de los acuíferos locales en relación con la proyección de la demanda de agua para un periodo predictivo al 2025 donde con el promedio de los dos acuíferos, el del Valle de Juárez y el de conejos Médanos no son autosuficientes para cubrir la demandas de consumo del 2015 al 2025 por lo que es necesario buscar nuevas fuentes de abastecimiento para cubrir ese periodo.



Figura 36 Proyección de la demanda y ofertas, fuentes actuales (JMAS, 2010).

En la figura 36 podemos apreciar el comportamiento esperado del acuífero con las fuentes actuales de suministro que son el acuífero Valle de Juárez (Bolsón del Hueco) con un rendimiento de 5400 lps. y el de Conejos Médanos (Mesilla) con 1000 lps actualmente no son suficientes para la demanda proyectada para el año 2025 de 9555 lps y que solo alcanzarían hasta el año 2012 con 6400 lps esta predicción se realizó el 2010 contando que habría una proyección de población mayor a la que realmente fue.

Con base en lo anterior este trabajo hace hincapié en la necesidad de utilizar metodologías modernas para poder plantear nuevas alternativas que permitan definir un mejor manejo del agua subterránea y tratarla como la parte imprescindible de un sistema integral que nos permita tener un desarrollo urbano sostenible, donde la comparación de la relación geoespacial existente entre la ampliación y crecimiento de la mancha urbana y la dirección de los flujos de agua subterránea modelados a futuro nos permitirán evaluar una perspectiva

de sustentabilidad hídrica subterránea. Por lo cual debemos de entender y modelar los impactos del crecimiento de la mancha urbana en la direccionalidad de los flujos subterráneos, caracterizando el movimiento del agua subterránea para la zona de estudio en el tiempo y modelarlo a futuro. Por lo que se requiere modelar el acuífero matemáticamente a futuro para conocer cuales la dirección de los flujos subterráneos a partir de la predicción de la ampliación de la mancha urbana Ciudad Juárez Chihuahua

Dada su trascendencia que representa y ante la presencia del recurso agua, es importante y necesario evaluar el comportamiento del acuífero, ante los posibles escenarios tanto de la extracción como de la recarga de este, para así poder sentar las bases para el uso y manejo del agua subterránea en un plan de desarrollo urbano sustentable a fin de evitar su agotamiento, haciendo sostenible tanto al ecosistema como a la sociedad que dependen de su uso.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Proyección de la población al 2030**

Para realizar el desarrollo de una investigación se requiere la realización de actividades e información y la utilización de diferentes instrumentos metodologías referentes a las ciencias naturales y las sociales. Es por esto, por lo que se requirió usar metodologías tanto cualitativas como cuantitativas por la necesidad de abordar al ambiente como un sistema complejo (García, 2008).

Dentro del marco metodológico se usó la información disponible como un antecedente que ha sido la base fundamental para realizar esta investigación. Posteriormente, se procedió a la descripción del área de estudio a escala de mancha urbana de Ciudad Juárez Chih., abordando tanto sus aspectos naturales como sociales más importantes. En esta primera etapa de la

metodología, se inició con la recopilación, consultas y análisis de antecedentes sobre el medio físico y los aspectos sociales como parte de las estrategias a mediano y largo plazo. En este sentido, se necesitó disponer de una visión perspectiva actual de la posible realidad demográfica futura en términos de planeación urbana. En otras palabras, se trató de idear un escenario donde se simulen los efectos del crecimiento poblacional sobre el territorio o el espacio urbano del Municipio de Juárez. Por lo cual se planteó primeramente una metodología de cómo se ha comportado el crecimiento de la población en los últimos 115 años de la cabecera de Ciudad Juárez, Chihuahua, por ser la ciudad más grande de la Región Paso del Norte, en donde se evaluó el incremento en las décadas pasadas, así como la tasa de crecimiento media anual presentada.

Se observa que la mayor tasa de crecimiento ocurrió en el año de 1995, con un 4.75%, vinculados al recurso hídrico y la expansión de la mancha urbana de Ciudad Juárez, Chihuahua.

Históricamente la demografía de Ciudad Juárez, Chihuahua se ha caracterizado por sus niveles altos de crecimiento de población debido principalmente, a la constante llegada de inmigrantes a la ciudad. Estas tasas de crecimiento son de las más altas que se han presentado en el México contemporáneo. Tan sólo durante el periodo transcurrido entre 1940 y el 2000, la cantidad de habitantes pasó de poco más de 48,881 personas a más de 1,187,000 millones. Este proceso se tradujo en tasas de crecimiento promedio anual tan altas que rondaron el 9% en la década de los cuarenta y por debajo del 4% en los noventa, decenio en el que el monto de la población se incrementó en casi 397,000 nuevos habitantes.

La principal razón de este rápido crecimiento se relaciona, con la alta movilidad de personas que se han desplazado hasta esta ciudad en el pasado, y, aunque cada vez con menor frecuencia, por migrantes pudieron lograr su cometido de llegar a Estados Unidos se han

quedado a residir en la ciudad. Al tiempo que la dinámica del mercado de trabajo local ha generado una alta demanda de fuerza laboral, sobre todo en los últimos treinta años, mucha de la cual ha tenido que llegar desde fuera puesto que la oferta de mano de obra local no ha solventado los puestos de trabajo generados (Gómez, 2005).

La tasa anual de crecimiento de Ciudad Juárez se redujo al 3.58 por ciento del año 2000 al 1.85 al 2005, cuando en periodos anteriores mantenía una tasa creciente rondando los 4 por ciento. Por lo anterior la disminución es debido por una parte a la desaceleración de la industria maquiladora en la frontera mexicana, a la competencia de los productos chinos y principalmente al surgimiento de altos índices de violencia en la ciudad, en los años subsiguientes decreció rápidamente hasta llegar al 0.30%, para después repuntar en el último conteo de población y vivienda con 1.04% en 2015.

Para la determinación las proyecciones de población para el periodo del 2015 al 2030 en esta investigación se tomó como base de población la proyección del Consejo Nacional de Población (CONAPO) se tiene información recabadas de diferentes dependencias tales como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), CONAPO y la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento (JMAS), la cual se muestra a continuación:

De acuerdo con el último conteo intercensal de población y vivienda del año 2015 realizado por INEGI la población para la cabecera de Ciudad Juárez es de 1, 391,180 habitantes. Por otro lado, las proyecciones de CONAPO 2015-2030 para la cabecera de Ciudad Juárez son para el año 2015 de 1,409,987 habitantes muy aproximado a la cifra real del INEGI de 1,391,180 Habitantes.

La JMAS con base en el número de Tomas Domesticas Activas y con el Índice de Hacinamiento para el año 2010 de 3.65, arroja la población de 1,450,167 habitantes (397,306 x 3.65), muy superior a la cifra real de 1,321,004 habitantes. El dato que proporciona CONAPO fue proyectado con base a los resultados de INEGI del año 2005 y 2010, se encuentra dentro de la media de los datos aquí comparados y existiendo la incertidumbre del comportamiento real de la población, se decidió tomar como población inicial el presentado de 1,409,987 habitantes para el 2015.

La información que proporciona la JMAS de acuerdo con el número de tomas domésticas, se descarta por la inexistencia de la relación de predios habitados, ya que pueden estar activas muchas de estas cuentas, pero no necesariamente se encuentran habitadas las viviendas, tal como lo demuestra el estudio realizado por “**Biwater**” (organización líder en soluciones sostenibles de agua tratada) en el año 2008 encontrando un 16% de inmuebles no habitados (COCEF, 2013).

En base a los datos obtenidos se tomó la decisión de utilizar como población base la del año 2015 proporcionada por CONAPO, siendo de 1,409,987 habitantes debido a la base en indicadores de proyecciones de población que dependen de muchas variables en las proyecciones que realiza CONAPO se toman en cuenta el crecimiento natural y social, natalidad, mortalidad así como otros indicadores demográficos, lo cual las hace que sean una de las proyecciones más apegadas al comportamiento real de la tendencia de crecimiento de la población.

## **2.2 Proyecciones de la población futura para un horizonte de 15 años (2030).**

Con datos históricos de la población que reporta INEGI y con la información ya calculada de la tasa de crecimiento media anual para Ciudad Juárez, de 1990 al 2015. Como resultado del

análisis de población histórica se presentan las tasas de crecimiento obtenidas descritas en la tabla 9 se analizarán cuatro diferentes métodos de cálculo, utilizando datos desde 1990 hasta el 2015 (COCEF, 2013).

Tabla 9 Tasas de Crecimiento Medio Anual

No.	Año	Población total (Hab)	Geométrico por incremento		Geométrico por interés compuesto	Tasa de crecimiento media anual (T.C.M.A.)
			Habitantes	Por ciento		
1	1990	789,522	-	-	-	-
2	1995	995,770	206,248	26.12%	0.0464	4.75
3	2000	1,187,275	191,505	19.23%	0.0352	3.58
4	2005	1,301,452	114,177	9.62%	0.0184	1.85
5	2010	1,321,004	19,552	1.50%	0.003	0.3
6	2015	1,391,180	70,176	5.31%	0.0104	1.04
		Total	<b>601,658</b>		<b>0.1133</b>	<b>2.88</b>

Se tomó como base el dato de población de 1, 409,987 habitantes del año 2015 en donde la CONAPO genero sus proyecciones para el periodo del 2010-2030. Para realizar el cálculo para el año de 2030, se utilizaron las tasas de crecimiento resultantes de los datos históricos proporcionados por INEGI, utilizando cinco diferentes métodos. El aritmético 24,032 hab/año, Geométrico por incremento 2.47%, Geométrico por interés compuesto 1.02% Malthus 2.47% y TCMA = 2.88%, en la tabla 10 se presentan los resultados de la proyección.

Tabla 10 Resultados de la proyección de población 2015-2030.

Año	Aritmético	Geométrico por		Malthus	T.C.M.A.
		Porcentajes	Interés Comp.		
	<b>24066.32</b>	<b>2.47%</b>	<b>1.02%</b>	<b>2.47%</b>	<b>2.88%</b>
2015	1,409,987	1,409,987	1,409,987	1,409,987	1,409,987
2016	1,434,053	1,444,369	1,442,301	1,441,474	1,450,610
2017	1,458,120	1,478,752	1,475,355	1,473,664	1,492,404
2018	1,482,186	1,513,134	1,509,167	1,506,573	1,535,401
2019	1,506,252	1,547,517	1,543,754	1,540,217	1,579,638
2020	1,530,319	1,581,899	1,579,134	1,574,612	1,625,149
2021	1,554,385	1,616,281	1,615,324	1,609,776	1,671,971
2022	1,578,451	1,650,664	1,652,344	1,645,724	1,720,142

Año	Aritmético	Geométrico por		Malthus	T.C.M.A.
		Porcentajes	Interés Comp.		
	24066.32	2.47%	1.02%	2.47%	2.88%
2023	1,578,451	1,685,046	1,690,212	1,682,476	1,769,702
2024	1,602,518	1,719,428	1,728,948	1,720,048	1,820,688
2025	1,626,584	1,753,811	1,768,572	1,758,459	1,873,144
2026	1,650,650	1,788,193	1,809,104	1,797,728	1,927,112
2027	1,674,717	1,822,576	1,850,565	1,837,874	1,982,634
2028	1,698,783	1,856,958	1,892,976	1,878,916	2,039,755
2029	1,722,849	1,891,340	1,936,359	1,920,875	2,098,523
2030	1,746,915	1,925,723	1,980,736	1,963,771	2,158,984

Los resultados de la proyección de la población que se presentó en este análisis por los cinco métodos empleados son muy parecidos, en donde se ve que el máximo valor es por Tasa de Crecimiento Medio Anual con 2,158,984 habitantes en tanto que el que presenta el valor más bajo es el Aritmético con 1,746,915 estos resultados los podemos observar en la figura 37.

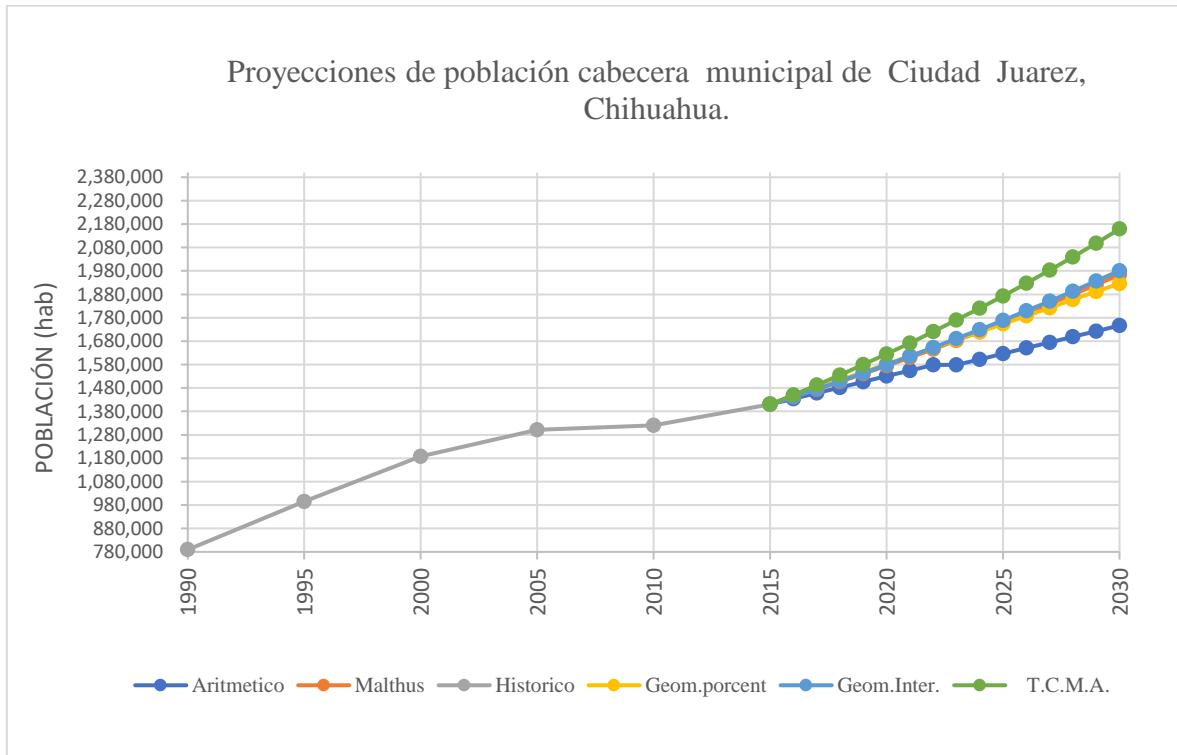


Figura 37 Comparativa de Proyecciones de Población 2015-2030.

En esta investigación se analizaron las Proyecciones de 2010 – 2030 del Consejo Nacional de Población (CONAPO) del sitio oficial en la Web para la localidad de Ciudad Juárez Chihuahua. Las tasas que maneja CONAPO son con tendencia a la baja al igual que los datos reportados por INEGI en la última década, se compararon las proyecciones realizadas por CONAPO 2000-2030 las que fueron muy aproximadas muy cerca de la realidad basadas al conteo del INEGI proyectando para el año 2010 una población de 1, 320,805 hab. Contra la que finalmente reporto INEGI en el Censo de Población de Vivienda del año 2010 de 1, 321,004 hab., teniendo una diferencia de 199 habitantes lo que representaría un acierto del 99.99%. por lo que se decidió usar las proyecciones de CONAPO para la realización de este estudio.

En la tabla 11 se comparan los diferentes métodos de población futura incluida la proyección de CONAPO con los diferentes métodos anteriormente presentados.

Tabla 11 Comparación de Proyecciones incluyendo a CONAPO (Conapo, 2015).

Año	Aritmético	Geométrico por		Malthus	T.C.M.A.	CONAPO
		Porcentajes	Interés Comp.			
2015	1,409,987	1,409,987	1,409,987	1,409,987	1,409,987	1,409,987
2016	1,434,053	1,444,369	1,442,301	1,441,474	1,450,610	1,422,149
2017	1,458,120	1,478,752	1,475,355	1,473,664	1,492,404	1,434,783
2018	1,482,186	1,513,134	1,509,167	1,506,573	1,535,401	1,447,564
2019	1,506,252	1,547,517	1,543,754	1,540,217	1,579,638	1,460,232
2020	1,530,319	1,581,899	1,579,134	1,574,612	1,625,149	1,472,717
2021	1,554,385	1,616,281	1,615,324	1,609,776	1,671,971	1,485,190
2022	1,578,451	1,650,664	1,652,344	1,645,724	1,720,142	1,497,815
2023	1,578,451	1,685,046	1,690,212	1,682,476	1,769,702	1,510,419
2024	1,602,518	1,719,428	1,728,948	1,720,048	1,820,688	1,522,956
2025	1,626,584	1,753,811	1,768,572	1,758,459	1,873,144	1,535,350
2026	1,650,650	1,788,193	1,809,104	1,797,728	1,927,112	1,547,515
2027	1,674,717	1,822,576	1,850,565	1,837,874	1,982,634	1,559,412
2028	1,698,783	1,856,958	1,892,976	1,878,916	2,039,755	1,571,021
2029	1,722,849	1,891,340	1,936,359	1,920,875	2,098,523	1,582,316
<b>2030</b>	1,746,915	1,925,723	1,980,736	1,963,771	2,158,984	<b>1,593,238</b>

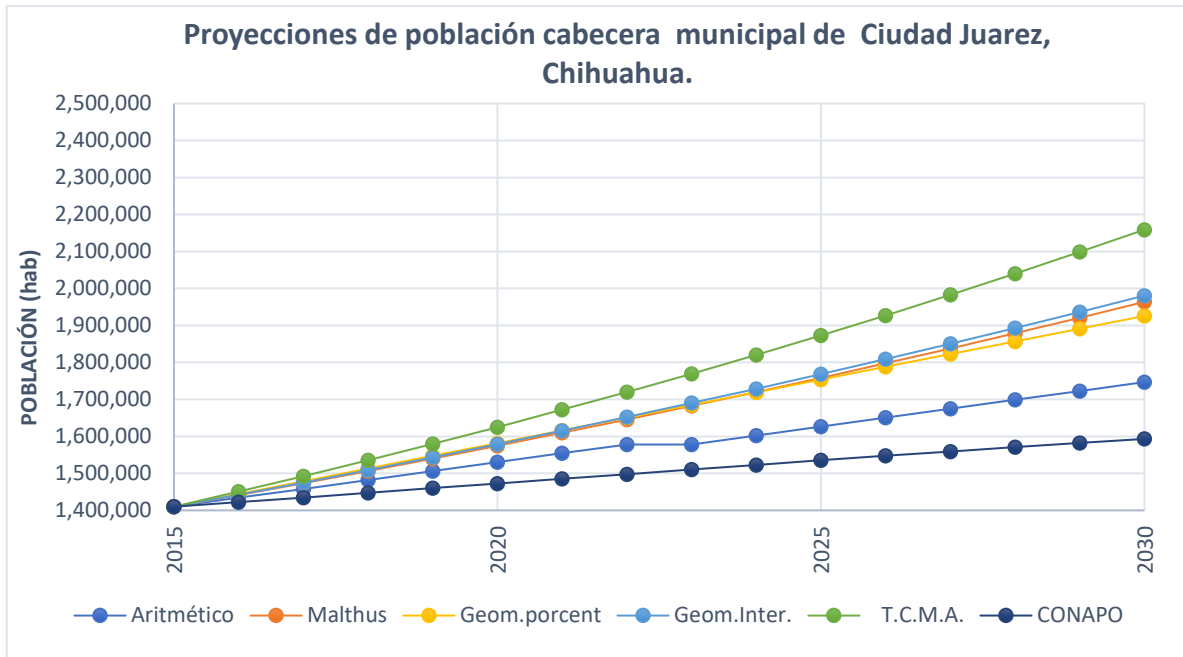


Figura 38 Comparación de proyecciones de población

En la figura 38 se exponen los diferentes métodos presentados, se determinó que el más apropiado para esta investigación fue el realizado por CONAPO 2010-2030, ya que manejar una tendencia bastante alta, y resulta arriesgado y poco probable de que se cumpla, por lo que es recomendable hacer estudios tanto de identificar las áreas idóneas para ubicar a esa nueva población, en este caso el incremento poblacional al 2030 que sería de 120,522 personas, así como de plantear escenarios en base a la extracción de agua potable basado en una proyección en base a una metodología probada como la de CONAPO la cual quedó comprobada con proyecciones con respecto al dato oficial proporcionado por INEGI para el año 2010. De tal forma que los datos de crecimiento de la población futura se estiman para el año 2030 será de 1, 593,238 habitantes según la proyección de CONAPO.

### 2.3 Crecimiento urbano histórico de Ciudad Juárez Chihuahua.

Ciudad Juárez, Chihuahua a lo largo del tiempo se ha caracterizado por su crecimiento urbano expansivo y disperso, en especial en la segunda mitad del siglo XX. Para el año 1950 la

mancha urbana representaba apenas 909.22 ha, creciendo un poco más del doble de lo que representaba en la década anterior con 379.14 ha, con una densidad de 134.80 hab/ha, densidad que no habrá de mostrar desde entonces. Después de esta década se presenta una explosión de crecimiento en la década de los años cincuenta, presentando para 1960 2,155.15 ha y una densidad de 85.54 hab/ha, lo que significa que cuadruplicó su tamaño con respecto de la década anterior disminuyendo considerablemente la densidad. En 1970 se muestra una superficie de 5,899.63 ha y una densidad de 69.05 hab/ha, acercándose bastante al doble de su tamaño diez años antes. Para la década de 1980 la ciudad presenta 10,795.11 ha de superficie y densidad de 50.44 hab/ha, creciendo en total 4,895.48 ha respecto a la década anterior. Para la década de 1990 la ciudad presentaba una superficie de 14,049.30 ha y una densidad de 56.20 hab/ha, con un crecimiento de 3,254.19 ha. Los primeros quince años del siglo XXI muestran un comportamiento errático de la mancha urbana. (IMIP, 2016).

El crecimiento de la cabecera Municipal de Ciudad Juárez ha tenido un crecimiento acelerado desde 1950 a 1990, con la economía favoreciendo al sector industrial y a los asalariados, sube la oferta de trabajo y por consecuencia el crecimiento poblacional; es en este período que inicia la ocupación de suelo en el poniente, especialmente el norponiente que muestra una mayor densidad de población, con ello se afectan coberturas matorral inerme micrófilo y matorral subinerme rosetófilo. Es en estas mismas fechas que se alientan programas federales de proyectos de urbanización hacia el sur y suroriente, lo que muchos consideran la primera intervención acertada del Estado en el proceso de ocupación del suelo.

Desde 1995, el crecimiento de la ciudad se orienta hacia el sureste, que coincide con tres cambios de los límites legales de la ciudad, bajo el argumento de la necesidad de nuevas reservas urbanas; es así como suelos naturales con cobertura vegetación secundaria arbustiva

y herbácea y vegetación de desiertos arenosos, y suelos de uso antropizado como la agricultura de riego, quedan inmersos en una categoría suburbana de inminente ocupación urbana.

Los mayores cambios de la configuración de la ciudad se observan durante 1990-1995, con una tendencia de ocupación hacia el Oriente, por la ocupación de la reserva Sur y Oriente-Zaragoza, donde se ubican suelos destinados a la agricultura de riego. Este proceso de ocupación presenta su mayor aceleración en el año 2005, por lo que en estas fechas desaparece casi por completo esta cobertura antrópica; con esto, termina la expansión hacia el oriente por el límite de la frontera con El Paso, Texas.

Los primeros quince años del siglo XXI muestran un comportamiento errático de la mancha urbana. El primer quinquenio de la década de los años 2000 tiene un crecimiento de 2,131.77 ha, dejando la mancha urbana en 22,684.77 ha. y una densidad de 57.37 hab/ha. Luego para el siguiente quinquenio se anexan a la existente mancha urbana cerca de las ocho mil hectáreas para el año 2010, un total de 7,920.72 ha dejado la superficie total en 30,605.49 ha con una densidad de 43.16 hab/ha. y finalmente, el siguiente quinquenio hacia el año 2015 el crecimiento sólo fue de 1,514.08 ha y una superficie total de 32,119.57 ha. con una densidad de 41.82 hab/ha., lo que demuestra la tendencia de crecimiento expansivo de la ciudad. Como lo vemos en la tabla 12.

Tabla 12 Crecimiento histórico de 1950 al 2015 (IMIP, 2016).

Año	Crecimiento/ha	Hab/ha
1950	909.22	134.8
1960	2155.15	85.54
1970	5899.63	69.05
1980	10795.11	50.44
1990	14049.3	56.2
2000	20553.01	58.8
2005	22684.77	57.37
2010	30605.49	43.16
2015	32119.57	41.82

#### **2.4 Crecimiento urbano 2015-2020-2030**

Al tener la población base del 2010 y la población estimada futura al 2030 se decidió usar los escenarios prospectivos que realizó el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP) donde a partir de las proyecciones de población generadas por el CONAPO para el municipio de Juárez, en los años 2015, 2020 y 2030, se visualizó el crecimiento, identificando las áreas hacia dónde dirigir el crecimiento urbano, sujetándose a los distintos lineamientos de orden federal en materia de desarrollo urbano, vivienda y sobre todo respetando las reservas naturales. Para determinar las áreas donde se puedan albergar a la nueva población, se consideraron varios aspectos, como el suelo vacío (baldíos) de una y más hectáreas, las rutas troncales (corredores urbanos) y troncales de transporte público, la Carta Urbana 2010, los perímetros de contención urbana de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) y el cinturón de la ciudad (Anillo Vial Periférico).

Los predios baldíos seleccionados se contemplaron para usos mixtos, es decir donde se involucran diferentes tipos de usos, como son la zona habitacional con la comercial, la de servicios, educativos, o de salud. Esta combinación de usos trae múltiples beneficios tanto

sociales como económicos, ya que la población tiene mayor y rápido acceso a los servicios, impulsa mayor comercio, dinamismo y fomenta mayor cohesión entre las personas, lo que favorecerá a contrarrestar la inseguridad y se contará con las condiciones para tener una movilidad más sustentable que permita la optimización de los traslados (IMIP, 2016).

Se muestra cada una de las zonas con los escenarios demográficos en los años 2015, 2020 y 2030 con la ubicación de la población ya proyectada. CONAPO estimó que para el año 2015 en Juárez habría una población de 1,409,987 personas, en el siguiente mapa se muestra el escenario ajustado de población 2015 por TAZ (Traffic Analysis Zones) es decir donde se concentra la población a este año, según la estimación del IMIP. Como lo vemos en la figura 39.

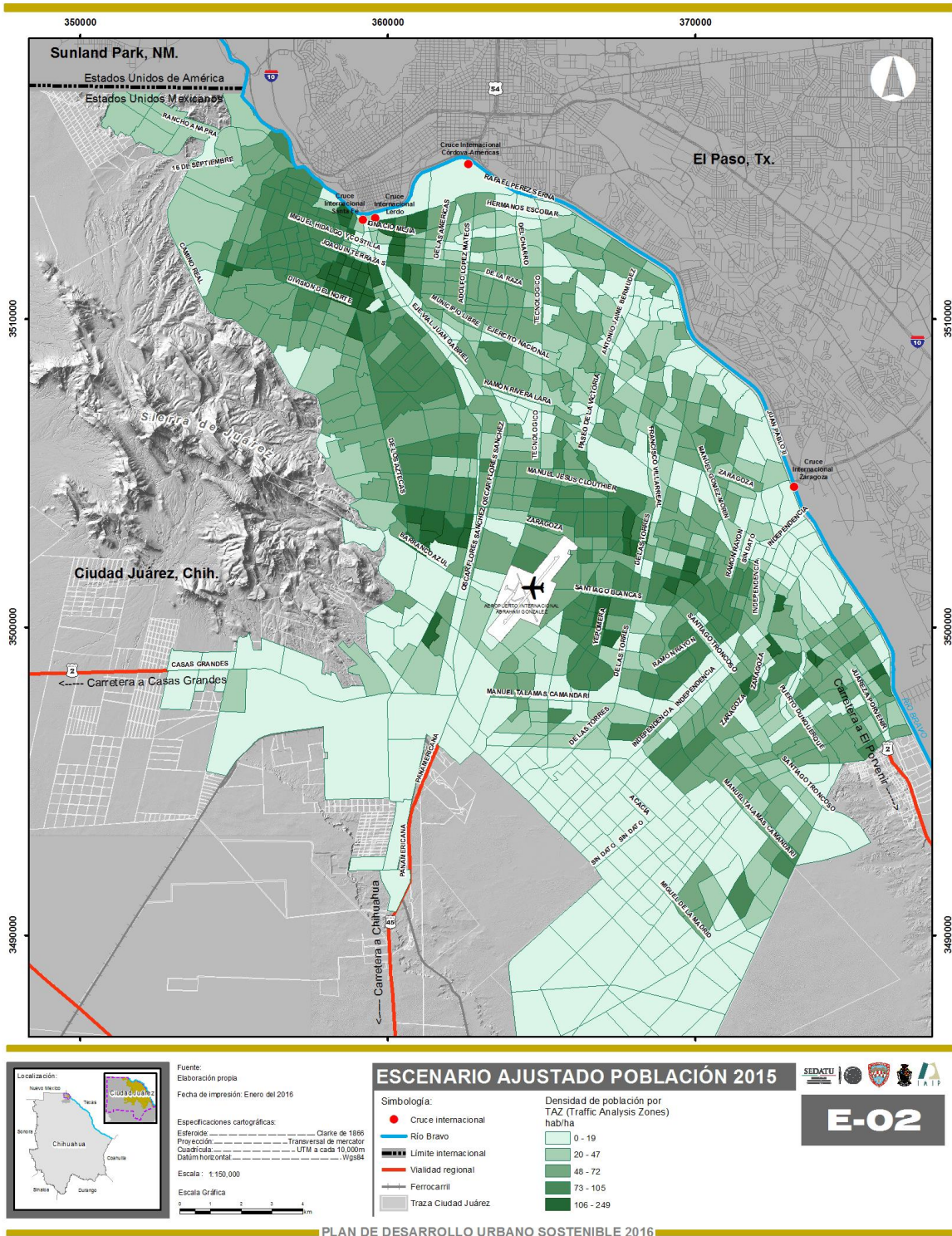


Figura 39 Escenario de población 2015 (IMIP, 2016).

## **2.5 Proyección del crecimiento urbano para un horizonte al 2020**

Partiendo de las proyecciones del CONAPO, Ciudad Juárez, Chihuahua tendrá una población de 1,472,717 habitantes al 2020, es decir, 62,730 habitantes más que en 2015 y para el 2030 1,593,238 habitantes, lo que significa un incremento de poco más de 120 mil respecto al 2020. Como ya se mencionó anteriormente, el IMIP se dio a la tarea de identificar las zonas estratégicas para albergar a la nueva población, lo que se traduce en la propuesta de ubicar espacialmente en las zonas más consolidadas y dentro del anillo vial periférico (AVP) a 62 mil habitantes al 2020 y a 120 mil habitantes para 2030.

Se contempló el aumento, identificando áreas donde se pudiera dar el crecimiento urbano, considerando varios factores, entre ellos el espacio disponible de una o más hectáreas, la cercanía a corredores urbanos, la compatibilidad de usos de la Carta Urbana 2010, los perímetros de contención urbana de la SEDATU y el anillo vial periférico (AVP). A continuación, se presentan detalladamente los criterios a considerar para diseñar la “ciudad deseable” y conocer los escenarios demográficos futuros para el año 2020 y posteriormente el 2030.

La metodología empleada por el IMIP fue la de revisar los usos de suelo y la evaluación de la selección se llevó a cabo para todos los corredores, se realizó un ajuste en los predios seleccionados, en el caso de la avenida Tecnológico quedaron 42 predios sumando un total de 71.93 ha. Los usos de suelo también determinan la cantidad de superficie destinada para vivienda y/o equipamiento, lo que para este primer corredor resultó en un área de 22.29 ha. disponibles para la construcción de vivienda, el porcentaje restante se destinó para equipamiento. Cabe destacar que a esta superficie también se le restó lo que señala el Plan de Desarrollo Urbano, que toda construcción debe dejar por lo menos un 30% de su superficie

para las vialidades necesarias, así como una donación del 12% para área verde en el caso de fraccionamientos.

Con la superficie destinada para vivienda de dicho corredor, la sumatoria de estos cálculos arrojó un total de 1,428 viviendas y al multiplicar cada una de ellas por el promedio de habitantes por vivienda de acuerdo con las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) en el que se localizan, se calculó una posible población de 4,809 habitantes. La ciudad ha mostrado una tendencia de crecimiento expansivo, del año 2000 al 2005 se tuvo un crecimiento de 2,131.77 ha. con una densidad de 57.37 hab/ha., para el siguiente quinquenio se anexaron a la mancha urbana casi ocho mil hectáreas, para 2010 la superficie total fue de 30,605.49 ha con una densidad de 43.16 hab/ha, hacia el año 2015 el crecimiento fue de 1,514.08 ha. con una densidad de 41.82 hab/ha.

Como se aprecia en la tabla 13, el número de baldíos varía considerablemente de un corredor a otro. A lo largo de ellos, los usos de suelo demarcados por la carta urbana se diferencian enormemente unos con otros.

Tabla 13 Baldíos seleccionados por superficie (IMIP, 2016).

<b>Corredor</b>	<b>Numero de Baldíos</b>	<b>Superficie total (ha)</b>	<b>Superficie disponible para Viviendas (ha)</b>
Tecnológico	42	71.93	22.29
Presidencia	1	1.17	0.47
De las Torres	24	29	7.53
Ejército Nacional	39	56.78	22.34
Paseo de la Victoria	53	90.33	36.93
Manuel Gómez Morin (A)	7	3.49	1.42
Manuel Gómez Morin (B)	60	95.96	44.81
Rafael Pérez Serna	1	3.52	2.04
<b>Total</b>	<b>227</b>	<b>352.18</b>	<b>137.83</b>

Una vez identificados los baldíos, la proporción de suelo habitacional, la densidad, las viviendas que se podrían desarrollar y la población según el promedio de habitantes de la

zona, el corredor Tecnológico, como ya se había mencionado, se proyecta una capacidad para albergar alrededor de 14,427 personas, posicionándose como el segundo corredor con mayor capacidad, en el corredor de Ejército Nacional un total de 8,418 personas, mientras que sobre el Paseo de la Victoria podrían ubicarse 3,759 viviendas con un total de 13,515 personas, en el corredor Boulevard Manuel Gómez Morín se fraccionó en dos secciones, sobre el tramo A se identificó la capacidad para 1,060 habitantes, mientras que en el tramo B, 20,304 habitantes, por último en el corredor Rafael Pérez Serna se contemplaron 246 viviendas con un total de 756 residentes. Serán necesarias 137.83 ha. para darle cabida a la población estimada para Ciudad Juárez, siendo un total de 18,222 viviendas las que alojarán el incremento de la población del año 2015 al 2020. El incremento de población será de 62,370 habitantes, mismos que se pudieron posicionar a lo largo de los ocho corredores como se muestra en la tabla 14 (IMIP, 2016).

Tabla 14 Baldíos seleccionados superficie, densidad (IMIP, 2016).

Corredor	Densidad-Carta Urbana		Duplicando Densidad		Triplicando Densidad	
	Viviendas Población/ha	Viviendas Población/ha	Viviendas Población/ha	Viviendas Población/ha	Viviendas Población/ha	Viviendas Población/ha
Tecnológico	1428	4809	2856	9618	4284	14427
Presidencia	38	148	76	296	114	450
De las Torres	344	1265	688	2530	1032	3794
Ejército Nacional	819	2805	1638	5610	2457	8415
Paseo de la Victoria	1253	4505	2506	9010	3759	13515
Manuel Gómez Morin (A)	113	353	226	706	339	1060
Manuel Gómez Morin (B)	1997	6768	3994	13536	5991	20304
Rafael Pérez Serna	82	255	164	510	246	765
<b>Total</b>	<b>6074</b>	<b>20908</b>	<b>12148</b>	<b>41816</b>	<b>18222</b>	<b>62730</b>

Con esta metodología de asignar la población proyectada por CONAPO del 2015 al 2020 se logra cumplir uno de los objetivos de cualquier ciudad que es a adecuar o ajustar dicha población en el suelo disponible cercano a los corredores urbanos a fin de impulsarlos para su consolidación. Como lo vemos en la figura 40.

Mapa 3: E-03 Escenario ajustado, Población 2020.

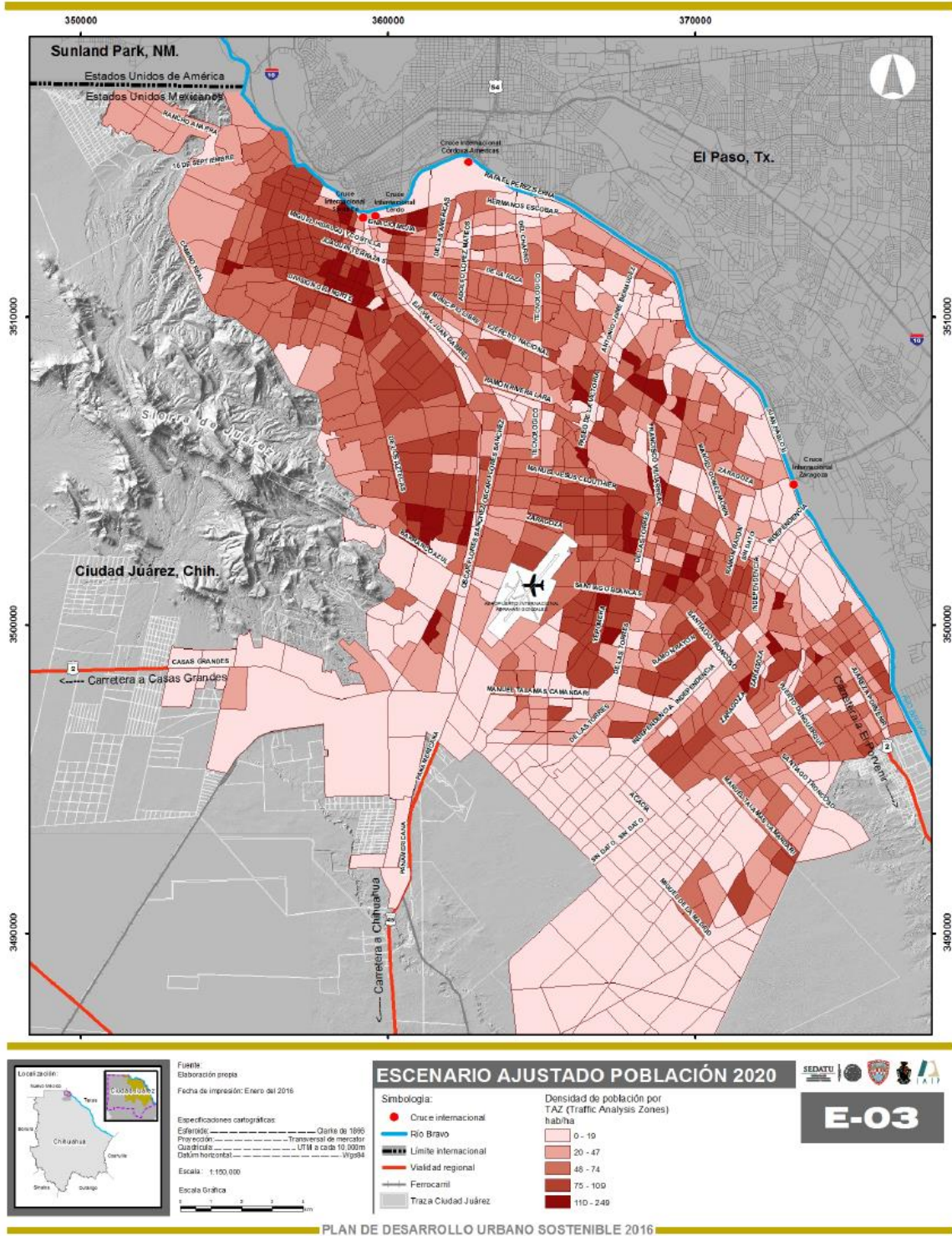


Figura 40 Escenario de población 2020 (IMIP, 2016).

## **2.6 Proyección del crecimiento urbano para un horizonte al 2030**

Se necesita disponer de una visión prospectiva actual de la posible realidad demográfica futura en términos de planeación urbana, en otras palabras, como simular los efectos del crecimiento poblacional sobre el territorio o el espacio urbano del Municipio de Juárez. Por tal motivo el Plan de Desarrollo Urbano Sostenible han presentado una metodología para escenarios futuros hasta un horizonte del 2030.

Este escenario 2030, no es más que el mismo esquema que se presentó en el ejercicio para el 2020, donde se pretende redensificar la ciudad para contrarrestar la dispersión urbana, que en las últimas tres décadas ha sufrido Ciudad Juárez.

Partiendo del crecimiento de la población que el Consejo Nacional de Población reportó en sus últimas proyecciones (2010-2050), y que tomo como punto de partida para identificar las áreas idóneas para ubicar a esa nueva población, en este caso el incremento poblacional del 2020 al 2030 sería de 120,522 personas.

Con el objetivo de cubrir aquellas zonas despobladas dentro del anillo vial periférico, se partió a identificar los lotes baldíos colindantes a los corredores viales propuestos, a diferencia del escenario 2020, en este caso se consideró un radio de influencia hacia los corredores de dos kilómetros, sin embargo aunque lo deseable es frenar el crecimiento de desarrollos habitacionales fuera del anillo vial sería difícil evitar que se sigan autorizando más fraccionamientos alejados de la ciudad, por lo que se estimó un porcentaje de población para estas zonas.

Como la metodología anterior del 2020 se buscaron lotes baldíos por corredores comerciales ampliando la búsqueda a 2 kilómetros de radio los baldíos, tal como se puede observar en la tabla 7, lográndose encontrar un total de 822 baldíos, con una superficie total de 646.76

hectáreas de las cuales sólo 38.8% son aptas para desarrollos habitacionales, esta superficie es neta, ya que se le restó un porcentaje para las vialidades así como para la dotación de áreas verdes tal como se mencionó detalladamente en el apartado anterior.

A diferencia del escenario 2020, en 2030 no se encontraron áreas baldías cercanas a los corredores sobre la Avenida Rafael Pérez Serna y Manuel Gómez Morín, ya que no hay espacios disponibles tabla 15.

Tabla 15 Baldíos seleccionados para el escenario 2030 (IMIP, 2016).

<b>Ruta Troncal y Pre-troncal</b>	<b>Numero de Baldíos Seleccionados</b>	<b>Superficie total de los baldíos seleccionados (ha)</b>	<b>Superficie disponible para vivienda (ha)</b>
Tecnológico	105	31.58	17.04
Presidencia	113	56.24	10.92
De las Torres	153	117.03	36.71
Ejército Nacional (Prolongación)	173	85.99	37.73
Paseo de la Victoria	121	135	57.67
Manuel Gómez Morin (A)	0	0	0
Manuel Gómez Morin (B)	56	99.69	44.53
Rafael Pérez Serna	0	0	0
Aeropuerto y Eje Vial Juan Gabriel	101	121.24	46.28
<b>Total</b>	<b>822</b>	<b>646.76</b>	<b>250.88</b>

Una vez seleccionadas las áreas, se estimó el número de viviendas según la superficie disponible, se le aplicó el promedio de habitantes para así generar la cantidad de población probable a habitar estos nuevos desarrollos. Aunque el enfoque general en este apartado es incentivar el crecimiento hacia el interior de la ciudad y no hacia las afueras, es y será imposible detener el crecimiento en zonas alejadas de la urbe, como parte de esta hipótesis, de que no se podrá frenar por completo el crecimiento fuera de anillo, se consideró que parte de la población habitara en 2030, lo pudiese hacer en áreas fuera del anillo vial periférico (zonas periurbanas). Por otra parte, la expansión de la mancha urbana que ha experimentado Juárez ha ido incorporando a poblados ubicados en el valle tal es el caso de San Agustín

Valdivia, además de polos de desarrollo como el área urbana de San Jerónimo. Dada la importancia de esta conurbación, en este escenario se visualiza también cual sería el crecimiento poblacional en estas partes del municipio. Como lo vemos en la tabla 16.

Tabla 16 Resultados de población y vivienda 2030 (IMIP, 2016).

<b>Ruta Troncal y Pre-troncal</b>	<b>Densidad-Carta Urbana Viviendas Población/ha</b>		<b>Duplicando Densidad Viviendas población/ha</b>		<b>triplicando Densidad Viviendas población/ha</b>	
Tecnológico	834	2773	1668	5546	2502	8320
Presidencia	670	2406	1340	4812	2010	7218
De las Torres	1821	6634	3642	13268	5463	19902
Ejército Nacional (Prolongación)	1410	4898	2820	9796	4230	14693
Paseo de la Victoria	2447	8601	4894	17202	7340	25802
Manuel Gómez Morin (A)	0	0	0	0	0	0
Manuel Gómez Morin (B)	1638	5283	3276	10566	4914	15850
Rafael Pérez Serna	0	0	0	0	0	0
Aeropuerto y Eje Vial Juan Gabriel	1440	5587	3276	11174	4319	15850
<b>Dentro del AVP</b>	<b>10260</b>	<b>36182</b>	<b>20520</b>	<b>72364</b>	<b>30778</b>	<b>108545</b>
San Agustín Valdivia					265	973
San Jerónimo					948	3489
Zonas Periurbanas					2042	7515
<b>Fuera del AVP</b>					<b>3255</b>	<b>11977</b>
<b>Total</b>	<b>10260</b>	<b>36182</b>	<b>20520</b>	<b>72364</b>	<b>34033</b>	<b>120.522</b>

En relación con las zonas disponibles y de acuerdo con su uso de suelo establecido, el tramo de Paseo de la Victoria fue donde se pudiese instalar mayor cantidad de población (25,802), lo que representa el 23.8% de toda la población dentro del AVP, sobre la Avenida de las Torres se podrían colocar al 18.3% de la futura población para Juárez. Por el Eje Vial Juan Gabriel, la Avenida Gómez Morín y Ejército Nacional el 15.4, 14.6 y 13.5% respectivamente. Lo que concierne a la Avenida Tecnológico y el tramo de la primera ruta troncal del semi masivo, tan sólo se le pudiesen adicionar el 7.7 y 6.6% de población (respectivamente), pues estas áreas ya se encuentran consolidadas actualmente o se considera que sean las primeras en redensificar en el corto y mediano plazo como lo vemos en la figura 41. Aunque la cantidad de población sigue en aumento, no ha crecido al mismo ritmo que en décadas

pasadas, esto debido a las tasas de natalidad, las cuales han venido disminuyendo gracias a la mayor cobertura en acceso a servicios de salud y programas de planificación familiar. (IMIP 2016) a continuación vemos en la figura con la distribución de Ciudad Juárez a un escenario al 2030 proyectado por el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP).

Mapa 4: E-04 Escenario ajustado, Población 2030.

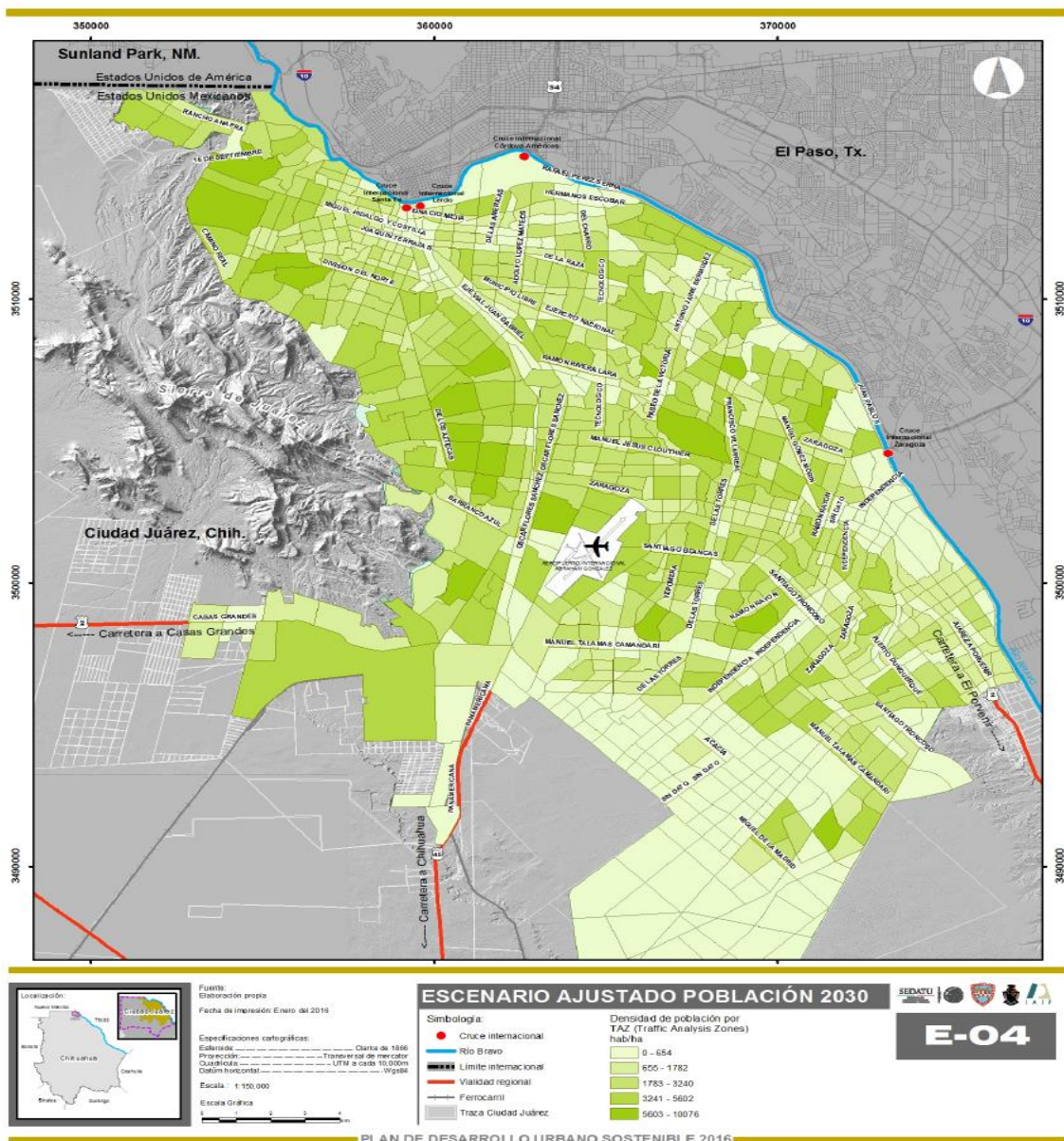


Figura 41 Escenario de población 2030 (IMIP, 2016).

Es importante resaltar que tanto especialistas, planificadores urbanos, así como los tomadores de decisiones, deben considerar estos escenarios futuros de crecimiento demográfico de Ciudad Juárez, para trabajar en la concepción de la ciudad ideal en cuanto a bienestar social y desarrollo económico.

## **2.7 Modelo Matemático**

Un modelo científico es una herramienta que reproduce el funcionamiento de un sistema natural, y cuyo objetivo es el estudio y el análisis de este sistema natural bajo diferentes condiciones. Permite, así mismo, obtener una visión de conjunto de los procesos naturales que en éste pueden actuar y analizar la incidencia de cada uno de los factores o variables presentes. Esto puede ser el caso del desarrollo urbano y su correlación con la disponibilidad de agua subterránea pudiendo predecir su comportamiento y respuesta cuando es sometido a unas situaciones de explotación determinadas.

El modelo matemático hidrogeológico propuesto en esta investigación, permitió determinar el comportamiento del acuífero, calcular el balance hídrico subterráneo, abatimientos y zonas de captura, modificar el sistema hidrogeológico de un estado de flujos subterráneos a otro mediante la elaboración de escenarios simulados (por ejemplo, incremento de los caudales de explotación, o nuevas zonas de explotación, para determinar el crecimiento de la ciudad de una forma sustentable), y que pueda modelarse obteniendo como resultado un escenario simulado que puede resultar factible o no de potencial explotación.

Los análisis de las simulaciones ayudan a la toma de decisiones, (como el análisis del Acuífero Valle de Juárez presentando escenarios con extracciones que simulen la demanda máxima futura o el aumento de la extracción para riego que conllevan al uso sostenible del

recurso hídrico), mediante la formulación de políticas adecuadas que utilizan los resultados del modelo matemático entre otras herramientas.

La modelación del flujo de agua subterránea se puede realizar a través de una representación matemática de los principios físicos que rigen la hidrología subterránea. De esta forma, la modelación matemática utiliza las ecuaciones fundamentales de flujo y conservación de masa para simular el flujo de agua subterránea y el transporte de sustancias disueltas (solute), en base a observaciones reales y percepciones de una localidad.

Para el presente estudio se seleccionó el programa computacional Visual ModFlow Clásico, el cual es un modelo de diferencias finitas, que permite resolver de forma numérica la ecuación de flujo estacionario en tres dimensiones, obtenidas a partir de la Ley de Darcy y la ecuación de Continuidad. La ventaja de los modelos de tres dimensiones con respecto a los de dos, es por su versatilidad para la asignación de condiciones de fronteras (ríos, drenes, etc.) la determinación de espesores de capas geológicas y la eliminación del efecto de penetración parcial de los pozos de producción.

El modelaje del acuífero se realizó en estado transitorio, debido a los datos con que se cuenta en el área de estudio, lo heterogéneo y anisotrópico del paquete sedimentario que comprende los acuíferos regionales siendo que el movimiento horizontal del agua subterránea es mayor que el movimiento vertical. De tal forma que en este estudio se aplicó la ecuación de flujo tridimensional de aguas subterráneas en estado transitorio, en un medio poroso.

Con el modelado matemático las ecuaciones matemáticas que describen los procesos de flujo y transporte subterráneo se pueden determinar a partir del principio fundamental de conservación de la masa de un fluido o de un soluto (Martínez-Alfaro, et al., 2006). Estos

autores establecen que este principio (o ecuación de continuidad) se puede combinar con una expresión matemática (Ley de Darcy), para obtener una ecuación de tipo diferencial que describa el flujo y el transporte. MODFLOW (definido como Modular three-dimensional finite-difference groundwater model por sus siglas en inglés) es un paquete computacional de uso comercial desarrollado por McDonald y Harbaugh, pertenecientes al U.S. Geological Survey (1988). Es capaz de simular el flujo de estado estacionario y transitorio en una, dos y tres dimensiones. Se basa en el método de diferencias finitas, un método que conduce a una aproximación numérica que permite una descripción y solución de problemas complejos de flujo de aguas subterráneas. Para subdividir horizontalmente la región de interés en un número de celdas rectangulares, se superpone sobre el área de estudio una rejilla rectangular. Las capas se utilizan para subdividir verticalmente las propiedades hidrológicas. El flujo subterráneo se realiza como un balance hídrico diferenciado para cada celda del modelo y la carga hidráulica se resuelve en el centro de cada nodo del modelo. MODFLOW permite asignar los flujos a los pozos, la recarga de agua superficial, ríos, drenajes, barreras de flujo, sumideros.

Cuando está conceptualizado el modelo MODFLOW permite simular el flujo del agua subterránea con una convergencia rápida, y una solución casi exacta para la mayoría de los sistemas (McDonald and Harbaugh 1988; Waterloo Hydrogeologic, 2006; Gao, 2011).

Este programa computacional permite la modelación de un sistema acuífero en tres dimensiones simulando el flujo en las capas acuíferas que pueden ser o no confinadas o una combinación de ambas. Las presiones externas de flujo en pozos, recarga, evapotranspiración conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento para cualquier capa, y como

en todo modelo numérico el objetivo de la modelación de un sistema subterráneo es la obtención de los siguientes parámetros:

- Evolución de los niveles estáticos en el agua subterránea  $h(x,y,z,t)$
- Velocidades de flujo en el entorno definido como zona de interés,  $v(x,y,z,t)$ .

MODFLOW cuenta con tres módulos distintos que son:

- Input: que es el modelo destinado a introducir datos: tales como geometría del modelo conductividades, recarga, pozos de observación y de bombeo, etc. Este módulo tiene celdas (filas y columnas) y estratos verticales (capas), en las celdas se define si será activa o inactiva permeable o impermeable, respectivamente. La discretización es realizada como “periodos de estrés” que son los incrementos sucesivos de tiempo.
- Run: este módulo es para ejecutar el modelo y tiene las opciones de elegir las distintas estimaciones de carga inicial, permite elegir distintos métodos numéricos de resolución y ajustar los criterios de cálculo y convergencia.
- Output: Este módulo permite la visualización de los resultados de simulación como series de tiempo, niveles piezométricos y de niveles freáticos para los distintos periodos de estrés

### **2.7.1 Modelo matemático en MODFLOW (Ecuación de flujo)**

MODFLOW se ha utilizado en todo el mundo debido a su fácil accesibilidad, facilidad de uso y versatilidad (Kashaigili, et al., 2003); (Rejani, et al., 2008). La versión utilizada para este estudio fue “Visual Modflow Classic”. la versión más moderna (desde 2014), denominada “Flex” es bastante diferente. Y cuando se llevó a cabo el estudio se decidió usar la versión clásica porque el flex tenía algunos módulos inactivos. MODFLOW resuelve una

forma tridimensional de la ecuación de flujo subterráneo de un medio poroso heterogéneo y anisotrópico, y se representa por medio de la siguiente ecuación diferencial parcial (Harbaugh, 2005).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W(x, y, z) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Dónde:

$h$ = Carga hidráulica.

$t$ = Tiempo

$K_x, K_y, K_z$ = Son componentes del tensor de conductividad hidráulica en las direcciones de los ejes de las coordenadas

$S_s$ = Coeficiente de almacenamiento específico.

$W$ = Es un término general de fuentes o sumideros y define los de entrada o salida al sistema en unidades de volumen por unidades de tiempo.

Esta ecuación tiene solución, sujeta a las condiciones límites de Dirichlet, donde se conoce el valor de la variable como la carga hidráulica inicial, es decir que  $(x,y,z,t) = (x,y,z,0)$  es determinada por el nivel freático del acuífero (Anderson, M. y Woessner, W., 1992).

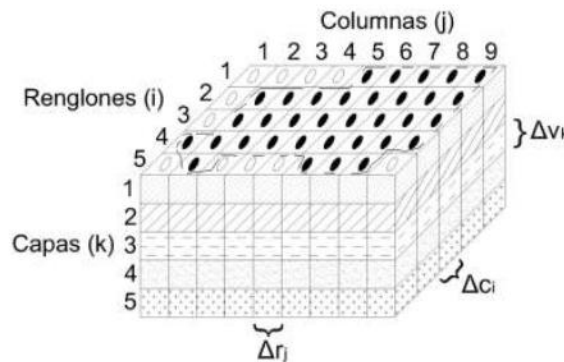
En la ecuación de flujo se hacen las siguientes consideraciones:

- El medio poroso está completamente saturado
- El flujo del agua se describe por la Ley de Darcy
- El medio poroso es compresible
- La porosidad y la permeabilidad son funciones espaciales

## 2.7.2 Discretización espacial y temporal en MODFLOW.

En MODFLOW un sistema acuífero es representado por medio de un arreglo de bloques llamados celdas, cuyas ubicaciones se describen en términos de renglones, columnas y capas. Figura 41 tiene un arreglo  $i, j, k$  que coincide con el sistema de coordenadas.

El arreglo  $i, j, k$ , representa en el modelo renglones, columnas y capas cuya intersección de dichas celdas tridimensionales tienen propiedades hidráulicas constantes por lo que cada valor asignado es uniformemente distribuido. Cada columna tiene un ancho  $\Delta r$ , cada renglón un ancho  $\Delta c$  y cada capa un espesor  $\Delta v$ . Un ejemplo de esto sería la celda (3,5,2) tiene un volumen  $\Delta c \cdot \Delta r \cdot \Delta v$  figura 42.



----- Límite del Acuífero

● Celda Activa

○ Celda Inactiva

$\Delta r_j$  Dimensión de la celda a lo largo de la dirección de la fila. subscrito (J) indica el número de la columna

$\Delta c_i$  Dimensión de la celda a lo largo de la dirección de la columna. subscrito (I) indica el número de la fila

$\Delta v_k$  Dimensión de celda a lo largo de la dirección vertical. subscrito (K) indica el número de la capa

Figura 42 Discretización hipotética de un sistema acuífero  
(Modificada de McDonald and Harbaugh, 1988).

Dentro de cada celda hay un punto llamado “nodo” en el cual se calcula la carga ( $h$ ) y se ubica en el centro de la celda. Existen dos convenciones para definir la configuración de celdas respecto a la ubicación de los nodos; estas son las formulaciones de “bloque centrado” y de “punto centrado”, Modflow utiliza la primera de estas configuraciones (figura 43).

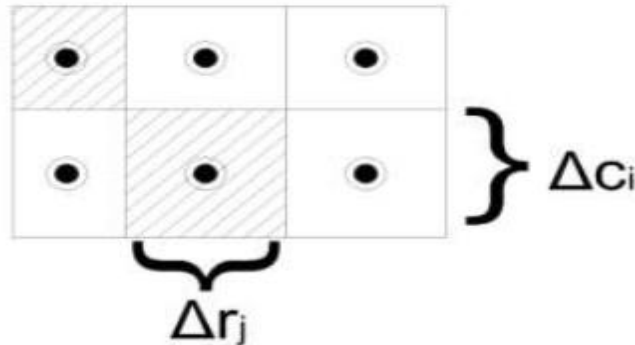


Figura 43 Sistema de bloque centrado.

### 2.7.3 Ecuaciones por diferencias finitas

Este método consiste en una aproximación de las derivadas parciales por expresiones algebraicas con los valores de la variable dependiente en un limitado número de puntos seleccionados. Como resultado de la aproximación, la ecuación diferencial parcial que describe el problema es reemplazada por un número finito de ecuaciones algebraicas, en términos de los valores de la variable dependiente en puntos seleccionados.

De acuerdo con la ecuación de continuidad, expresando el balance de flujo en una celda la suma de todos los flujos de entrada y salida a cada celda debe ser igual a la razón de cambio en el almacenamiento de esa misma celda (Harbaugh, 2005; Todd, 1980).

$$\sum Q_i^- = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (2)$$