

# Trabajo Fin de Máster

## *ELABORACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE LA CIUDAD DE PUJILÍ (ECUADOR) Y PROPUESTA DE MEJORA*

**Intensificación:** *HIDRÁULICA URBANA*

**Autor:**

*KLEBER CAJAMARCA QUISHPE*

**Tutor:**

*DR. JAVIER SORIANO OLIVARES*

**Cotutor:**

*DR. JORGE GARCÍA - GARCÍA SERRA*

**NOVIEMBRE, 2018**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**



## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** ELABORACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE LA CIUDAD DE PUJILÍ (ECUADOR) Y PROPUESTA DE MEJORA

**Título del TFM en inglés:** ELABORATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE WATER DISTRIBUTION NETWORK OF THE CITY OF PUJILÍ (ECUADOR) AND PROPOSAL OF IMPROVEMENT

**Título del TFM en Valenciano:** ELABORACIÓ DEL MODEL MATEMÀTIC DE LA RED DE DISTRIBUCIÓ D'AGUA DE LA CIUTAT DE PUJILÍ (EQUADOR) I PROPOSTA DE MILLORA

**Alumno:** KLEBER GEOVANNI CAJAMARCA QUISHPE.

**Tutor:** DR. JAVIER SORIANO OLIVARES

**Cotutor:** DR. JORGE GARCÍA SERRA GARCÍA

**Director experimental:**

**Fecha de Lectura:** NOVIEMBRE, 2018

### Resumen

#### En español

MEDIANTE EL PRESENTE TRABAJO SE PRETENDE CREAR UN MODELO MATEMÁTICO QUE PERMITA SIMULAR, ANALIZAR, EVALUAR Y ESTABLECER CRITERIOS TÉCNICOS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN LA CIUDAD DE PUJILÍ, CANTÓN PUJILÍ, PROVINCIA DE COTOPAXI-ECUADOR. LA RED ABASTECE UN ÁREA DE 9.85 KM<sup>2</sup>, CON UNA POBLACIÓN PRÓXIMA A 21,057 HABITANTES. LA RED DE ABASTECIMIENTO SE ENCUENTRA DISTRIBUIDO EN 8 SECTORES, ESTOS SECTORES ESTÁN CLASIFICADOS DE ACUERDO AL TANQUE DE ALMACENAMIENTO QUE LOS ALIMENTA.

PARA LA CREACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO SE TRABAJÓ CON LOS SOFTWARE AUTOCAD, ARCMAP, EPACAD, EXCEL Y EPANET, CON EL FIN DE GENERAR UNA ESQUELETIZACIÓN DE LA RED EXISTENTE, DONDE SE INCLUYEN LOS NUDOS CON SUS CARACTERÍSTICAS BÁSICAS, COMO COTA Y DEMANDA, ASÍ COMO TAMBIÉN LA RED DE TUBERÍAS CARACTERIZADAS POR SU LONGITUD, DIÁMETRO, ETC. TERMINADA LA ESQUELETIZACIÓN DE LA RED, SE GENERA UN ARCHIVO .INP EJECUTABLE EN EPANET,



DONDE SE PUDO CONTINUAR CON EL DESARROLLO DEL MODELO, AJUSTANDO CARACTERÍSTICAS DE LAS FUGAS DEPENDIENTES DE LA PRESIÓN, EL MODELO SE ESPERA QUE SE APROXIME A LA SITUACIÓN REAL DE LA RED, PARA ELLO SE COTEJÓ CON LA INFORMACIÓN DEL CAUDAL INYECTADO, DATOS OTORGADOS POR LA EMPRESA PÚBLICA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE PUJILÍ (EPAPAP).

UNA VEZ CREADA LA RED Y ANALIZANDO SU COMPORTAMIENTO ACTUAL, A PARTIR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS, SE PROPUSO IMPLEMENTAR MEDIDAS DE MEJORA QUE PERMITEN OPTIMIZAR EL RENDIMIENTO, SE PROPUSO LA COLOCACIÓN DE 7 VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN UBICADAS ESTRATÉGICAMENTE, CON EL FIN GESTIONAR LAS PRESIONES Y DISMINUIR FUGAS.

### En valenciano

PER MITJÀ DEL PRESENT TREBALL ES PRETÉN CREAR UN MODEL MATEMÀTIC QUE PERMETA SIMULAR, ANALITZAR, AVALUAR I ESTABLIR CRITERIS TÈCNICS DEL COMPORTAMENT DE LA XARXA DE DISTRIBUCIÓ D'AIGUA EN LA CIUTAT DE PUJILÍ, CANTÓN PUJILÍ, PROVÍNCIA DE COTOPAXI-ECUADOR. LA XARXA ABASTIX UNA ÀREA DE 9.85 KM<sup>2</sup>, AMB UNA POBLACIÓ PRÒXIMA A 21,057 HABITANTS. LA XARXA D'ABASTIMENT ES TROBA DISTRIBUÏT EN 8 SECTORS, ESTOS SECTORS ESTAN CLASSIFICATS D'ACORD AL TANC D'EMMAGATZEMAMENT QUE ELS ALIMENTA.

PER A LA CREACIÓ DEL MODEL MATEMÀTIC ES VA TREBALLAR AMB ELS PROGRAMARI AUTOCAD, ARCMAP, EPACAD, EXCEL I EPANET, A FI DE GENERAR UNA ESQUELETIZACIÓ DE LA XARXA EXISTENT, ON S'INCLOUEN ELS NUCS AMB LES SEUES CARACTERÍSTIQUES BÀSIQUES, COM A COTA I DEMANDA, AIXÍ COM TAMBÉ LA XARXA DE CANONADES CARACTERITZADES PER LA SEUA LONGITUD, DIÀMETRE, ETC. ACABADA L'ESQUELETIZACIÓ DE LA XARXA, ES GENERA UN ARXIU .INP EXECUTABLE EN EPANET, ON ES VA PODER CONTINUAR AMB EL DESENROTLLAMENT DEL MODEL, AJUSTANT CARACTERÍSTIQUES DE LES FUGUES DEPENDENTS DE LA PRESSIÓ, EL MODEL S'ESPERA QUE S'APROXIME A LA SITUACIÓ REAL DE LA XARXA, PER A AIXÒ ES VA CONFRONTAR AMB LA INFORMACIÓ DEL CABAL INJECTAT, DADES ATORGATS PER L'EMPRESA PÚBLICA D'AIGUA POTABLE I CLAVEGUERAM DE PUJILÍ (EPAPAP) .

UNA VEGADA CREADA LA XARXA I ANALITZANT EL SEU COMPORTAMENT ACTUAL, A PARTIR DELS RESULTATS OBTINGUTS, ES VA PROPOSAR IMPLEMENTAR MESURES DE MILLORA QUE PERMETEN OPTIMITZAR EL RENDIMENT, ES VA PROPOSAR LA COL•LOCACIÓ DE 7 VÀLVULES REDUCTORES DE PRESSIÓ UBICADES ESTRATÈGICAMENT, AMB EL FI GESTIONAR LES PRESSIONS I DISMINUIR FUGUES.

### En inglés



THIS WORK AIMS TO CREATE A MATHEMATICAL MODEL THAT ALLOWS TO SIMULATE, ANALYZE, EVALUATE AND ESTABLISH TECHNICAL CRITERIA ABOUT WATER NETWORK DISTRIBUTION BEHAVIOR IN PUJILI CITY, PUJILI CANTON, COTOPAXI PROVINCE – ECUADOR. THIS NETWORK PROVIDES WATER FOR AN AREA OF 9.85 KM<sup>2</sup> AND 21,057.0 POPULATION APPROXIMATELY. THE SUPPLY NETWORK IS DISTRIBUTED IN 8 SECTORS, AND EACH ONE IS CLASSIFIED ACCORDING THE GREAT STORAGE TANK THAT FEEDS THEM.

THE MATHEMATICAL MODEL WAS WORKED WITH SOFTWARE TOOLS AS AUTOCAD, ARCMAP, EPCAD, EXCEL Y EPANET, THE GOAL IS TO GENERATE AN EXISTING NETWORK SKELETONIZATION INCLUDING NODES WITH BASIC CHARACTERISTICS LIKE COTA AND DEMANDA EVEN THE PIPE NETWORK WITH ITS LENGTH AND DIAMETER ETC.

ONCE FINISHED THE NETWORK SKELETONIZATION IT GENERATED A .INP FILE FOR EPANET EXECUTION, THIS FILE ALLOWS CONTINUED WITH THE MODEL ADJUSTING CHARACTERISTICS OF THE LEAKS DEPENDENTS OF THE PRESSURE. THE MODEL IS AN EXPECTATIVE ABOUT THE REAL NETWORK SITUATION; IT WAS COLLATED WITH THE INJECTED FLOW INFORMATION, DATA COLLECTED BY THE PUBLIC COMPANY OF POTABLE AND SEWER OF PUJILI (EPAPAP).

ONCE CREATED THE NETWORK AND ANALYZING ITS BEHAVIOR THE REGISTERED RESULTS ALLOWS TO PROPOSE IMPLEMENT MEASURES FOR OPTIMIZE IT PERFORMANCE, THE BEST OPTION IS SET 7 PRESSURE REDUCING VALVES LOCATED STRATEGICALLY, THE MAIN GOAL IS MANAGE PRESSURES AND DECREASE LEAKS.

**Palabras clave español:** MODELO, EPANET, DISTRIBUCIÓN, MEJORA, RED.

**Palabras clave valenciano:** MODEL, EPANET, DISTRIBUCIÓ, MILLORA, XARXA.

**Palabras clave inglés:** MODEL, EPANET, DISTRIBUTION, IMPROVEMENT, NETWORK.





## AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de cumplir mis objetivos, por brindarme la fortaleza el coraje y la fe, a mis padres Eugenio y María Elena por siempre brindarme su apoyo incondicional, por sus sabios consejos, por su esfuerzo y confianza.

A mi tutor Javier Soriano Olivares y Codirector Jorge García- Serra García, quienes con su conocimiento y paciencia han sido mi guía y motivación para culminar mi etapa de estudio con éxito, también me gustaría agradecer a la Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de Pujilí, por su aporte para la culminación de este trabajo.



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	1
1.2 CIUDAD DE PUJILÍ .....	2
1.3 EMPRESA PÚBLICA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE PUJILÍ .....	2
1.4 ZONA DE ESTUDIO .....	3
<b>2. DESCRIPCIÓN RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE .....</b>	<b>5</b>
2.1 ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE PUJILÍ .....	5
2.2 FUENTES DE ABASTECIMIENTO .....	6
2.3 CONDUCCIÓN Y TRANSPORTE .....	6
2.4 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN .....	6
2.5 TANQUE DE ALMACENAMIENTO .....	7
2.6 SECTORIZACIÓN ACTUAL .....	7
2.7 CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN .....	8
2.8 DIÁMETROS Y LONGITUDES DE TUBERÍAS .....	9
2.9 BALANCE HÍDRICO .....	9
2.9.1 VOLUMEN DE AGUA INYECTADA .....	10
2.9.2 RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO .....	10
2.9.3 MODULACIÓN DE LA DEMANDA .....	11
<b>3. MODELO MATEMÁTICO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE PARA LA CIUDAD DE PUJILÍ – ECUADOR .....</b>	<b>12</b>
3.1 ETAPAS DE LA ELABORACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO .....	12
3.1.1 INFORMACIÓN INICIAL .....	13
3.1.2 PROCEDIMIENTO PARA CREAR EL MODELO DE LA RED EXISTENTE .....	13
3.1.2.1 OBTENCIÓN DE LOS NUDOS DE LA RED EXISTENTE .....	14
3.1.2.2 ASIGNACIÓN DE COTAS A NUDOS .....	17
3.1.2.3 ASIGNACIÓN DE DIÁMETROS A TUBERÍAS DEL MODELO .....	28
3.1.2.4 EDICIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO DE RED.....	31
3.2 ASIGNACIÓN DE DEMANDAS A NUDOS DE CONSUMO. DENSIDAD POBLACIONAL UNIFORME .....	32
3.2.1 INFORMACIÓN INICIAL .....	33
3.2.2 DETERMINACIÓN DEL CONSUMO MEDIO DIARIO APROXIMADO .....	34
3.2.3 ASIGNACIÓN DE LAS DEMANDAS A NUDOS DE CONSUMO .....	34
3.2.3.1 PROCEDIMIENTO PARA LA ASIGNACIÓN DE LAS DEMANDAS A NUDOS DE CONSUMO	35
3.2.3.2 <i>SIMULACIÓN DEL MODELO EN EPANET CON DEMANDAS, COTAS Y DIÁMETROS</i> .....	47
3.2.3.3 ZONIFICACIÓN DE LA RED DE ACUERDO A LOS PUNTOS DE ALIMENTACIÓN.....	49
3.3 ASIGNACIÓN DEL CONSUMO MEDIO DE ACUERDO AL REPORTE MENSUAL DE AGUA FACTURADO .....	51
3.3.1 INFORMACIÓN INICIAL .....	52
3.3.2 ASIGNACIÓN DE DEMANDAS A NUDOS POR ZONAS DE DISTINTA DENSIDAD POBLACIONAL .....	54
3.4 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN CONSUMIDO, AUTORIZADO Y NO FACTURADO ..	66



3.4.1	INFORMACIÓN INICIAL .....	67
3.4.2	UBICACIÓN DE LAS INSTITUCIONES QUE NO PAGAN EL AGUA POTABLE .....	69
3.4.3	ASIGNACIÓN DEL CAUDAL CONSUMIDO AUTORIZADO NO FACTURADO .....	75
3.5	CALCULO DEL COEFICIENTE EMISOR PARA REPRESENTAR LAS FUGAS .....	78
3.5.1	FUGAS DEPENDIENTES DE LA PRESIÓN .....	78
3.5.2	INFORMACIÓN INICIAL .....	80
3.5.3	ASIGNACIÓN DE CAUDAL FUGADO POR MEDIO DE EMISORES.....	80
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS, SIMULACIONES Y RESULTADOS .....</b>	<b>84</b>
4.1	ESTUDIO DE PRESIONES .....	84
4.2	ESTUDIO DE VELOCIDADES.....	84
4.2.1	VELOCIDAD MÍNIMA.....	85
4.2.2	VELOCIDAD MÁXIMA .....	85
4.3	ESTUDIO DE CAUDALES .....	86
4.4	ANÁLISIS DE PÉRDIDAS UNITARIAS .....	87
4.5	DIAGNÓSTICO DE LA RED EXISTENTE DE ACUERDO AL MODELO EN EPANET... ..	87
4.5.1	EVOLUCIÓN DE LOS CAUDALES A LO LARGO DE LAS 24 HORAS.....	88
4.5.2	EVALUACIÓN DE LOS COSTES DEL AGUA.....	89
4.5.3	BALANCE HÍDRICO TÉCNICO DE LA RED.....	91
4.5.4	EL BALANCE HÍDRICO DE LA IWA (RED DE LA CIUDAD DE PUJILÍ) .....	92
<b>5.</b>	<b>PROPUESTA DE MEJORAS.....</b>	<b>94</b>
5.1	IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS CON ALTAS PRESIONES .....	94
5.2	SECTORIZAR LOS NUDOS CON ALTAS PRESIONES.....	95
5.3	COLOCACIÓN DE VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN .....	95
5.4	EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA DESPUÉS DE GESTIONAR LAS PRESIONES .....	96
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>100</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>101</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>102</b>
8.1	CÁLCULO DE CAUDAL INYECTADO EN EL DÍA.....	102
8.2	EJEMPLO DE CÁLCULO DE VÁLVULAS.....	103
8.3	PRESUPUESTO REFERENCIAL DE LA INSTALACIÓN DE LAS VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN .....	105



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación Geográfica de la ciudad de Pujilí.....	3
Figura 2 Mapa de límites de la ciudad de Pujilí.....	4
Figura 3 Mapa de distribución de agua potable (elaboración propia).....	5
Figura 4 Esquema de captación y distribución de agua potable.....	5
Figura 5 Captaciones superficiales (fuente: EPAPAP).....	6
Figura 6 Planta de tratamiento de potabilización (fuente: EPAPAP). ....	6
Figura 7 Tanque de almacenamiento.....	7
Figura 8 Diámetros en la red. ....	8
Figura 9 Resumen de diámetros Red Pujilí.....	9
Figura 10 Curva de modulación para 24 horas.....	11
Figura 11 Etapas de la elaboración del Modelo .....	12
Figura 12 Dibujo de la red existente.....	13
Figura 13 Datos de la tubería existente y capa del diámetro.....	14
Figura 14 Red existente solo tuberías en formato .dxf. ....	14
Figura 15 Selección de capas y definir tolerancia en EpaCad. ....	15
Figura 16 Exportar en formato .dxf red de Epanet .....	15
Figura 17 Visualizar red en Autocad y copiar solo nudos.....	16
Figura 18 Copiar y pegar con coordenadas de origen nudos y guardar en .dxf.....	16
Figura 19 Creación hoja de trabajo en ArcMap y definir proyección Geográfica. ....	17
Figura 20 Definir el sistema de proyección geográfica de nudos y tubos de red. ....	18
Figura 21 Transformación de formato .dxf a .shp en ArcMap. ....	18
Figura 22 Añadir nuevas columnas para calcular coordenadas y cota del nudo. ....	19
Figura 23 Verificación de la correspondencia de nudos en ArcMap y Epanet.....	19
Figura 24 Curvas de nivel en polyline y guardar en .dxf.....	20
Figura 25 Asignación de Sistema de proyección geográfica a curvas de nivel.....	21
Figura 26 Convertir curvas de nivel de formato .dxf a .shp. ....	21
Figura 27 Revisión de propiedades de las curvas de nivel en formato .shp. ....	22
Figura 28 Crear TIN utilizando herramientas de ArcMap.....	22
Figura 29 Selección de datos de entrada para crear el TIN, definir campo elevación ...	23
Figura 30 Imagen TIN creada y visualización por coloración las alturas. ....	23
Figura 31 Visualización TIN en 3D de la superficie del proyecto en ArcScene.....	24
Figura 32 Proyección de la foto satelital a la superficie 3d TIN en ArcScene. ....	24
Figura 33 Interpolación de puntos con la superficie creada TIN.....	25
Figura 34 Cálculo de la elevación de cada nudo.....	25
Figura 35 Tabla de atributos cotas en cada nudo. ....	26
Figura 36 Exportar tabla como .dbf.....	26
Figura 37 Exportar Información desde Epanet.....	27
Figura 38 Información en Excel edición.....	27
Figura 39 Visualización de cotas de nudos en Epanet y ArcMap. ....	28



Figura 40 Asignación del sistema de proyección geográfica a tuberías.....	28
Figura 41 Transformación a .shp, numeración de elementos en ArcMap y Epanet. ....	29
Figura 42 Exportar tabla de atributos de las líneas (tubería existente) al Excel. ....	30
Figura 43 Diámetros de tuberías en Epanet y verificación de numeración de líneas....	30
Figura 44 Edición del Modelo en Epanet y asignación de Embalses. ....	31
Figura 45 Etapas para la asignación de demandas a los nudos del Modelo. ....	32
Figura 46 Exportar Modelo corregido y con embalses a formato .dxf.....	35
Figura 47 Selección de nudos de consumo, con coordenadas en formato .dxf. ....	36
Figura 48 Asignar sistema de proyección geográfica a nudos de consumo.....	36
Figura 49 Transformación a formato .shp nudos de consumo en ArcMap.....	37
Figura 50 Trazado de polígonos de Thiessen en ArcMap.....	37
Figura 51 Polígonos trazados.....	38
Figura 52 Asignación de sistema de proyección geográfica y transformación .shp. ....	38
Figura 53 Recortar Polígonos con el contorno del área de cobertura de la red. ....	39
Figura 54 Polígonos recortados.....	39
Figura 55 Creación de nuevas columnas en la tabla de atributos de polígonos. ....	40
Figura 56 Ingreso de demanda media total. ....	40
Figura 57 Cálculo de las áreas de cada polígono.....	41
Figura 58 Visualizar el área total de los Polígonos. ....	41
Figura 59 Asignar el valor del área total de los polígonos.....	42
Figura 60 Cálculo de la demanda de nudos.....	42
Figura 61 Valores calculados de demanda a cada nudo y revisión de sumatoria.....	43
Figura 62 Revisión de nudos en ArcMap y Epanet. ....	43
Figura 63 Verificación de la numeración de los nudos de consumo.....	44
Figura 64 Exportar tabla de atributos de nudos con demandas. ....	45
Figura 65 Información del Epanet exportar a Excel. ....	45
Figura 66 Trabajos en Excel asignación de demandas a nudos Epanet. ....	46
Figura 67 Verificación de las demandas ingresadas a nudos en Epanet.....	46
Figura 68 Modelo de Epanet con demandas en cada nudo.....	47
Figura 69 Modelo en Epanet con la primera simulación sin errores. ....	47
Figura 70 Asignación de diámetros internos.....	48
Figura 71 Modelo en Epanet Zonificada.....	49
Figura 72 Resultados de presión y cota en Epanet. ....	50
Figura 73 Etapas de asignación de consumo medio facturado a nudos del Modelo.....	51
Figura 74 Fotografía Satelital de la ciudad de Pujilí. ....	53
Figura 75 Zonificación en Autocad. ....	55
Figura 76 Asignación de sistema de proyección geográfica a zonificación.....	55
Figura 77 Recortar Zonificación con contorno del área de estudio. ....	56
Figura 78 Zonificación de acuerdo al área de estudio.....	56
Figura 79 Creación de nuevas columnas en la tabla de atributos de la zonificación.....	57
Figura 80 Colocación del número de zona. ....	57



Figura 81 Consumo medio facturado Ingresado, edición terminada. ....	58
Figura 82 Cálculo de áreas de cada zona.....	58
Figura 83 Verificación del total de consumo medio facturado Ingresada. ....	59
Figura 84 Verificación del área total de las zonificaciones. ....	59
Figura 85 Edición de la capa copiada polígonos.....	60
Figura 86 Delimitar zonas y polígonos.....	60
Figura 87 Polígonos delimitados por zonas.....	61
Figura 88 Creación de nuevas columnas en tabla de atributos por zonas.....	62
Figura 89 Cálculo de áreas parciales. ....	62
Figura 90 Cálculo de consumo medio facturado por nudos. ....	63
Figura 91 Consumo medio facturado calculado por cada nudo y zonificada. ....	63
Figura 92 Exportar la tabla de atributos al Excel.....	64
Figura 93 Asignación de consumo medio facturado a cada nudo de Epanet.....	64
Figura 94 Comparación de Información de ArcMap y Epanet. ....	65
Figura 95 Modelo de Epanet con consumo medio facturado.....	65
Figura 96 Etapas para determinar el volumen consumido, autorizado no facturado... 66	
Figura 97 Abrir la fotografía satelital de la ciudad de Pujilí. ....	70
Figura 98 Recortar Fotografía satelital Pujilí. ....	70
Figura 99 Dibujo de polígonos.....	71
Figura 100 Edición en tabla de atributos de polígonos. ....	71
Figura 101 Consumo medio no facturado ingresadas al cuadro de atributos.....	72
Figura 102 Intersección de áreas con polígonos. ....	72
Figura 103 Creación de columnas para consumo medio no facturado. ....	73
Figura 104 Cálculo de áreas.....	73
Figura 105 Cálculo de consumo medio no facturado por nudos. ....	74
Figura 106 Comparación del consumo medio no facturado total ingresado. ....	74
Figura 107 Exportar tablas de atributos con Q consumido no facturado.....	75
Figura 108 Asignación de consumo no facturado a Epanet. ....	76
Figura 109 Comparación del consumo no facturado ingresado al Epanet con ArcMap. 76	
Figura 110 Modelo con Caudales consumidos facturados y no facturados. ....	77
Figura 111 Curva de Modulación Horaria en Epanet. ....	77
Figura 112 Etapas para el cálculo del coeficiente emisor. ....	78
Figura 113 Cálculo del coeficiente emisor en Excel. ....	80
Figura 114 Ingreso del coeficiente emisor a cada nudo del Modelo de Epanet.....	81
Figura 115 Modelo de red en Epanet con las demandas reportadas. ....	81
Figura 116 Flujoograma del cálculo de los coeficientes emisores para el modelo.....	82
Figura 117 Presiones máximas y mínimas.....	84
Figura 118 Velocidades mínimas en la red.....	85
Figura 119 Velocidades máximas en la red. ....	85
Figura 120 Caudales en tuberías. ....	86
Figura 121 Evolución de los caudales en la tubería durante las 24 horas. ....	86



Figura 122 Perdida unitaria mca/km. ....	87
Figura 123 Curvas de evolución de caudales en las 24 horas. ....	89
Figura 124 Volumen anual de agua en la red. ....	90
Figura 125 Coste anual del volumen de agua en la red. ....	90
Figura 126 Mapa de Isolíneas presiones máximas en red ciudad de Pujilí. ....	94
Figura 127 Estado inicial de tubería Cerrada (zonificación). ....	95
Figura 128 Introducción de válvula en Epanet. ....	96
Figura 129 Mapa de Isolíneas presiones máximas con y sin VRP. ....	97
Figura 130 Evolución horaria de caudales. ....	98
Figura 131 Volumen anual inyectado a la red con VRP. ....	99
Figura 132 Coste anual de agua inyectada de la red con VRP. ....	99
Figura 133 Catalogo de BERMAD .....	103





## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Plantas de tratamiento de agua potable. ....	7
Tabla 2 Tanques de reserva existentes. ....	7
Tabla 3 Sectorización de la red existente. ....	8
Tabla 4 Información de Volúmenes EPAPAP .....	10
Tabla 5 Balance de la red existente .....	11
Tabla 6 Nudos eliminados y tuberías, nudos creados. ....	31
Tabla 7 Información de usuarios conectados a la red EPAPAP .....	33
Tabla 8 Dotación sugerida (Secretaría del Agua, 2015). ....	33
Tabla 9 Calculo de Q demandado aproximado. ....	34
Tabla 10 Nudos eliminados .....	44
Tabla 11 Diámetros Interiores .....	48
Tabla 12 Zonificación de red existente.....	49
Tabla 13 Reporte mensual EPAPAP .....	52
Tabla 14 Datos empresa EPAPAP .....	52
Tabla 15 Porcentaje de distribución de habitantes por sector .....	53
Tabla 16 Demandas por Zonas de diferente densidad poblacional.....	54
Tabla 17 Dotación por uso Norma Ecuatoriana hidrosanitaria.....	67
Tabla 18 Consumo de centros educativos.....	67
Tabla 19 Consumo de oficinas municipales.....	68
Tabla 20 Consumo de Centros de salud. ....	68
Tabla 21 Consumo de Plazas y Mercados .....	69
Tabla 22 Datos de caudales .....	80
Tabla 23 Coeficiente global de fugas.....	83
Tabla 24 Evolución de caudales en las 24 horas. ....	88
Tabla 25 Volumen y coste de agua inyectada a la red existente. ....	89
Tabla 26 Datos para balance hídrico técnico. ....	91
Tabla 27 Rendimiento volumétrico de la red.....	91
Tabla 28 Valoración según rendimiento global.....	91
Tabla 29 Datos para balance hídrico de la IWA.....	93
Tabla 30 Resultados del balance hídrico de la IWA.....	93
Tabla 31 Válvulas a instalar. ....	96
Tabla 32 Datos para balance hídrico técnico red con VRP .....	97
Tabla 33 Rendimientos volumétricos del balance hídrico técnico red con VRP .....	97
Tabla 34 Reporte diario del Modelo de Epanet .....	102
Tabla 35 Características de la válvula .....	103
Tabla 36 Diseño de válvula .....	104
Tabla 37 Presupuesto de la implementación de VRP.....	105



## 1. INTRODUCCIÓN

El proyecto “Elaboración del modelo matemático de la red de distribución de agua de la ciudad de Pujilí (Ecuador) y propuesta de mejora” tiene como principal objetivo la creación de un modelo hidráulico funcional para la ciudad de Pujilí, con el propósito de evaluar el funcionamiento de la red existente en diferentes escenarios y así mejorar la gestión del sistema.

El proyecto se desarrolla en 2 etapas, primera etapa: obtención de información, catastro de los elementos del sistema, número de usuarios, volumen facturado, volumen inyectado, costo total recaudado. Esta primera parte corresponde a la información otorgada por la Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de Pujilí (EPAPAP); segunda etapa: elaboración del modelo matemático, evaluación de la red existente y propuesta de mejora.

El proyecto consta de ocho capítulos, en el primer y segundo capítulo se describen los datos generales, objetivos y las características principales de la red existente. En el tercero se presentan las actuaciones realizadas para la elaboración del modelo matemático de la red de distribución de la ciudad en sus diferentes etapas como es la creación de las tuberías, nudos de consumo y la asignación de los diferentes caudales, en el cuarto se presenta los resultados de la simulación del modelo identificando las zonas de presiones máximas así como las pérdidas unitarias de carga, en el quinto capítulo se presenta la propuesta de mejora y en el sexto capítulo se describe las de conclusiones y recomendaciones y finalmente se presenta la bibliografía y anexos.

### 1.1 OBJETIVOS

Los objetivos básicos perseguidos con el presente trabajo son:

- Crear un modelo matemático funcional de la red de abastecimiento de la ciudad, para mejorar la gestión del sistema.
- Dotar de una herramienta útil para estimar el funcionamiento de la red de abastecimiento de la ciudad de Pujilí.
- Realizar el diagnóstico del funcionamiento de la red existente.
- Identificar los puntos críticos de la red de abastecimiento de la ciudad mediante el modelo desarrollado.

- Proponer mejoras en el sistema de distribución y analizar dichas mejoras.

## 1.2 CIUDAD DE PUJILÍ

La ciudad de Pujilí está ubicada a 11 km al Oeste de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi país (Ecuador), pertenece a la única parroquia urbana del cantón que lleva su mismo nombre, Pujilí. En sus inicios fue habitada por los “Aborígenes Panzaleos”, quienes se dedicaban a labores agrícolas y a labores de alfarería, estos nativos en el siglo XV fueron conquistados por los Incas, durante la época de la colonia el pueblo Pujillense gracias a su producción de especies vegetales y animales constituyeron méritos suficientes para que en 1657 la Real Audiencia de Quito funde el asiento Doctrinero del Dr. San Buenaventura de Puxili, así mismo dentro del periodo republicano el 14 de octubre de 1852 Pujilí es reconocido como cantón de la provincia de Cotopaxi.

Las principales actividades económicas de la ciudad son la enseñanza, comercio, administración pública, transporte y almacenamiento, construcción, agricultura, industrias manufactureras, actividades de alojamiento y servicio de comidas, artes y entretenimiento y recreación.

## 1.3 EMPRESA PÚBLICA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE PUJILÍ

La Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de Pujilí (EPAPAP), fue creada mediante la ordenanza municipal del 5 de septiembre del 2013, publicada en el registro oficial N° 111 del martes 29 de octubre de 2013. La empresa está constituida por 3 áreas que son: financiera, técnica y administrativa – secretaria general y facturación.

La empresa desde su constitución ha venido mejorando el sistema existente, ya que el incremento de usuarios han obligado que se realice trabajos por administración directa incrementando redes, construyendo tanques de almacenamiento y plantas de tratamiento para la potabilización; uno de los principales problemas que se tiene al momento de gestionar el sistema, es el desconocimiento del comportamiento de la red en las distintas horas del día y épocas del año, también al no conocer la capacidad actual instalada han llevado a que se tenga problemas de suministro en las nuevas redes construidas, otro de los principales problemas es que no se cuenta con el personal ni las

instalaciones necesarias para manejar un sistema de suministro de agua potable de una ciudad.

#### 1.4 ZONA DE ESTUDIO

##### Ubicación Geografía

La ciudad de Pujilí se encuentra ubicada en la zona centro del país específicamente en la provincia de Cotopaxi (ver Figura 1), a 84 km de la ciudad de Quito (Capital de Ecuador), se encuentra a una altura de 2980 msnm, con una superficie aproximada de 9.85 Km<sup>2</sup> y una población de 21,057 habitantes. Asimismo, la temperatura media anual es de 13 °C y la precipitación varía desde 500 a 1000 mm.

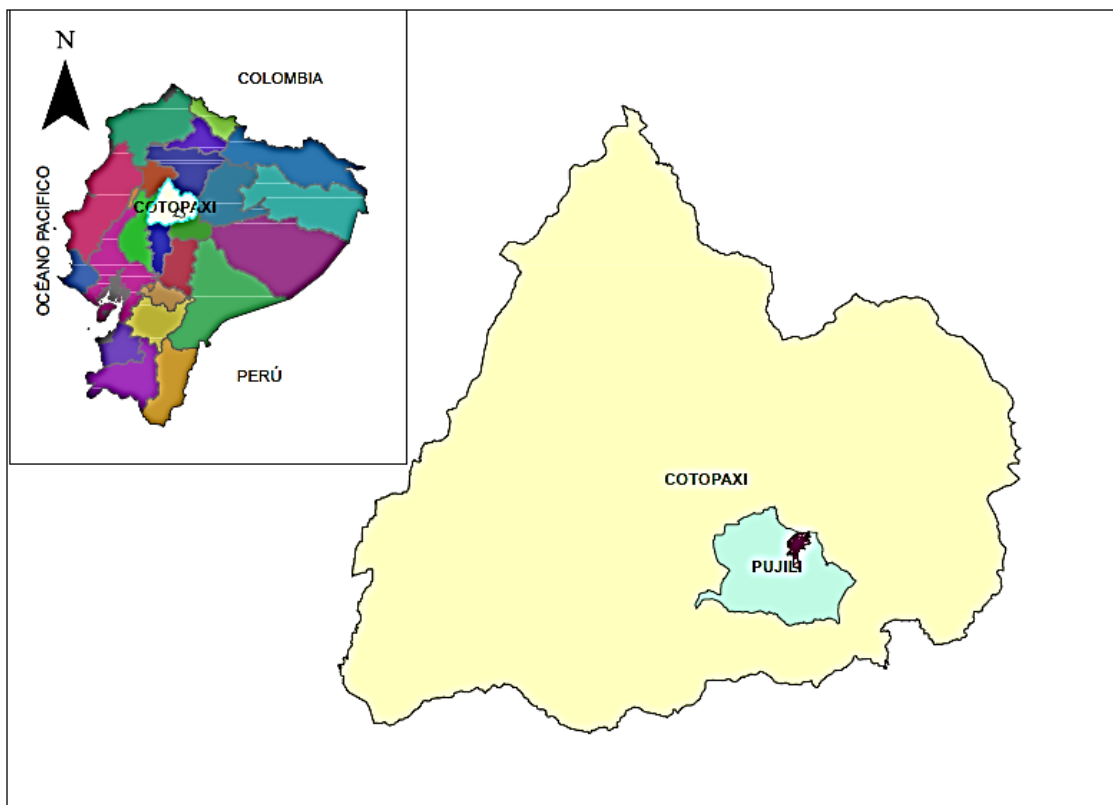


Figura 1 Ubicación Geográfica de la ciudad de Pujilí.

##### Delimitación de la ciudad de Pujilí

**Sector Norte**, entre la intersección de las calles Pichincha y Gabriel Álvarez hasta la intersección de la calle pichincha y S/N hasta la Av. Velasco Ibarra (barrio Guapulo).

**Sector Sur**, entre la paralela del eje de la calle Pichincha (vía a la Merced) barrio Danzapamba.



Sector Este, limitado por el barrio Las Gardenias vía Belisario Quevedo y al Oeste limitado por el Barrio 4 Esquinas vía Tingo Guapulo como se visualiza en la Figura 2.

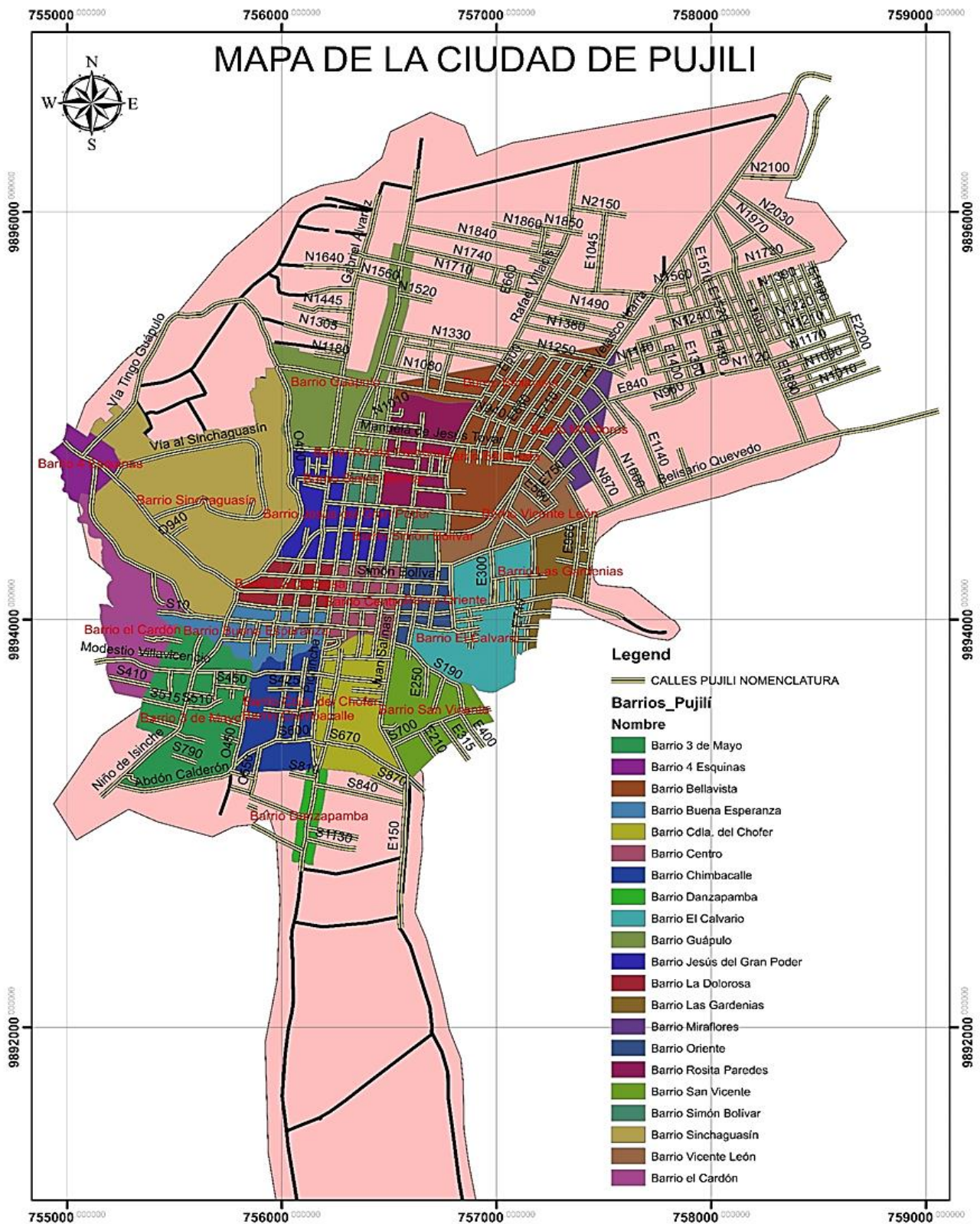


Figura 2 Mapa de límites de la ciudad de Pujilí.

## 2. DESCRIPCIÓN RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

La Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de Pujilí (EPAPAP), es la encargada de abastecer y administrar el servicio de agua potable de la ciudad de Pujilí. El consumo promedio mensual de la población es de 164,475 m<sup>3</sup>. Actualmente, para la provisión del agua a la ciudad se ha zonificado la red tal como se observa en la Figura 3.

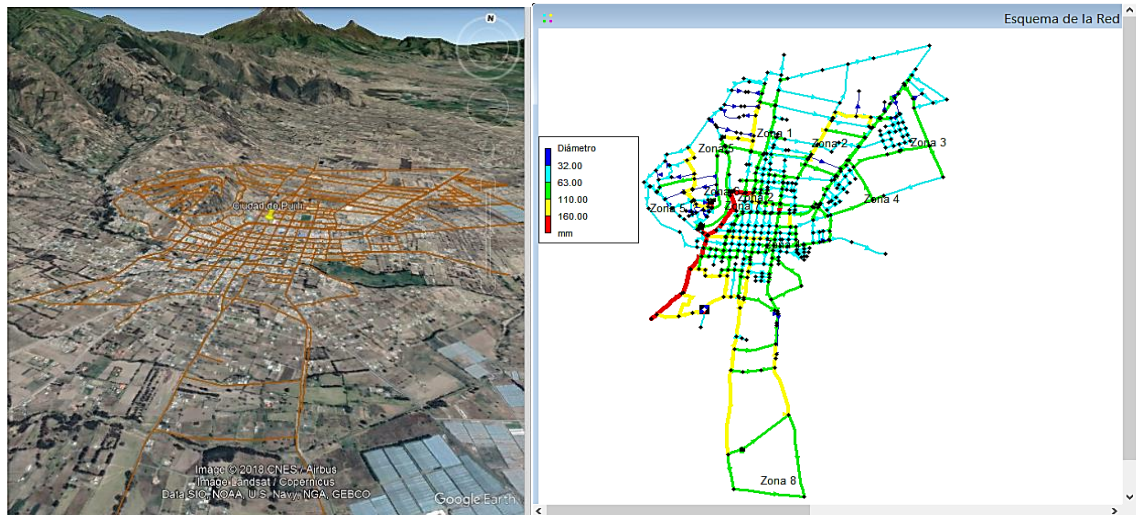


Figura 3 Mapa de distribución de agua potable (elaboración propia).

### 2.1 ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE PUJILÍ

Según datos de la Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de Pujilí (EPAPAP), en el año 2018 abastece a 5331 abonados que representa aproximadamente a 21,057 habitantes, esto se logra gracias a las captaciones superficiales con las que cuenta el sistema.

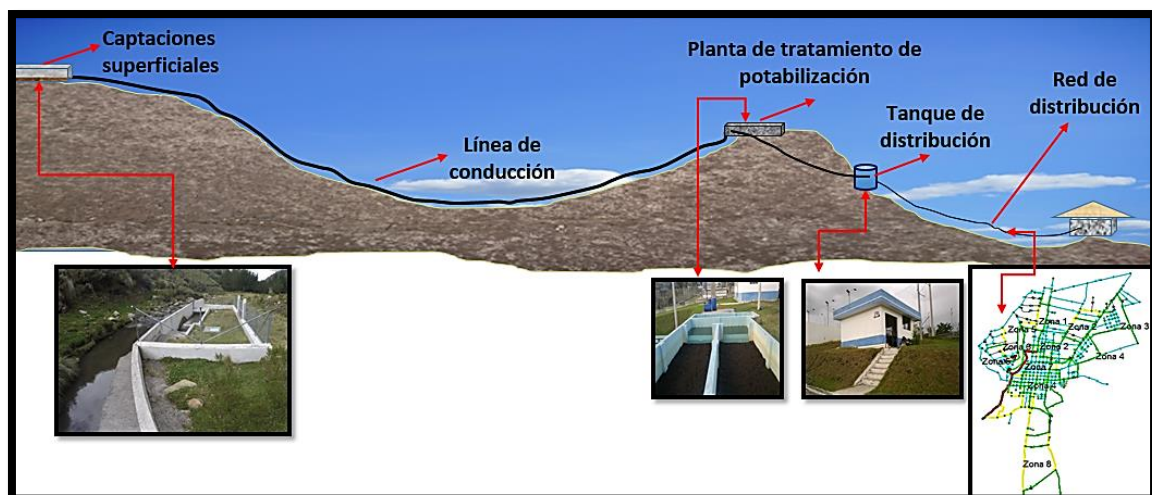


Figura 4 Esquema de captación y distribución de agua potable.



## 2.2 FUENTES DE ABASTECIMIENTO

La principal fuente de abastecimiento de agua cruda para la ciudad de Pujilí proviene de dos captaciones superficiales ubicadas en los ríos, la primera en la junta de los ríos Palanganá y Cuchihuasi y la segunda en el río Cuturiví, por otro lado el caudal medio captado es de 66.18 l/s según datos de la empresa EPAPAP.



Figura 5 Captaciones superficiales (fuente: EPAPAP).

## 2.3 CONDUCCIÓN Y TRANSPORTE

La línea de conducción del sistema funciona a gravedad y consta de 3 trayectos que conectan las captaciones y las plantas de tratamiento de potabilización, el primer tramo que corresponde a un total de 1,10 km de tubería de PVC, de un diámetro nominal de 200 mm, el segundo tramo tienen una longitud de 6,6 km, compuestos en diámetros equivalentes de 200 a 160 mm de PVC y Acero y finalmente un tramo de 1.23 km de PVC con un diámetro nominal de 160 mm que finaliza su trayecto en la planta de tratamiento de potabilización “La Gloria”.

## 2.4 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN

El sistema existente cuenta con 5 plantas de tratamiento de potabilización, las mismas que se encuentran ubicadas en el cerro de Sinchaguasín que es la parte más elevada de la ciudad y desde ahí alimenta a los tanques de almacenamiento (ver Tabla 1).



Figura 6 Planta de tratamiento de potabilización (fuente: EPAPAP).



Tabla 1 Plantas de tratamiento de agua potable.

Nombre PTAP	Capacidad
	Q (l/s)
<b>La Gloria</b>	10.0
<b>Rumipamba</b>	3.0
<b>El Cardón</b>	5.0
<b>Sinchahuasín Alto</b>	36.0
<b>Sinchahuasín Medio</b>	20.0

## 2.5 TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Los tanques existentes son de hormigón armado, los más antiguos fueron construidos en los años 1980, de ahí que se tuvo la necesidad de implementar nuevas unidades los cuales fueron construidos a partir del año 2010, cada uno cuenta con su respectiva cámara de válvulas y tienen diferente volumen de almacenamiento como se detalla en la Tabla 2.



Figura 7 Tanque de almacenamiento.

Tabla 2 Tanques de reserva existentes.

Tanque	Antiguo	Nuevo
	V(m <sup>3</sup> )	V(m <sup>3</sup> )
<b>R-1</b>	800	-
<b>R-2</b>	380	-
<b>R-3</b>	380	900
<b>R-4</b>	380	300
<b>R-5</b>	100	-
<b>R-11</b>	10	30
<b>R-7</b>	-	230
<b>R-10</b>	-	150

## 2.6 SECTORIZACIÓN ACTUAL

La red de distribución de la ciudad de Pujilí, en la actualidad se encuentra distribuida en 8 sectores según datos de la empresa EPAPAP, con el fin de gestionar la red de mejor

manera, cada uno de estos sectores corresponde a un tanque de alimentación, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Sectorización de la red existente.

Sector	Tanque
1	R-1
2	R-2
3	R-3
4	R-4
5	R-5
6	R-11
7	R-7
8	R-10

## 2.7 CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

La red actual es en su mayoría de tipo mallada, garantizando así la distribución de agua por varias rutas a los usuarios en cada sector, el material de las tuberías existentes es PVC, sus diámetros nominales varían desde 32 mm a 200 mm en los distintos ramales de la red, una vez se levantó el modelo se presenta una configuración global del sistema como se observa en la Figura 8.

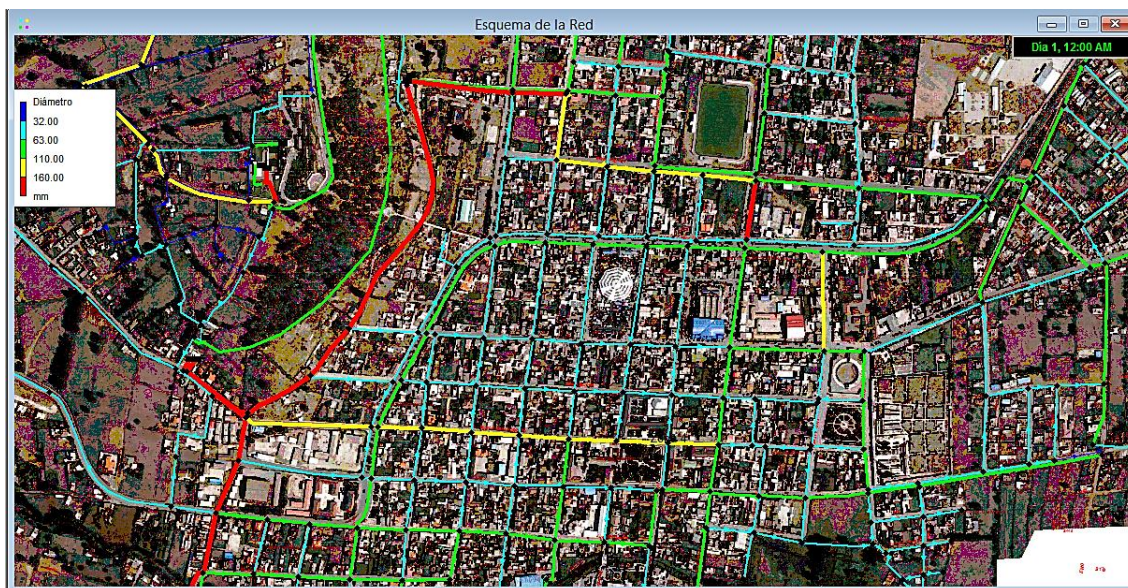


Figura 8 Diámetros en la red.

## 2.8 DIÁMETROS Y LONGITUDES DE TUBERÍAS

El sistema cuenta con aproximadamente 89.1 km de tubería PVC, dispuestos en ramales principales y secundarios, con diámetros nominales que van desde los 32 mm a los 200 mm siendo el de mayor porcentaje el de 63 mm con una longitud total de 23.42 km correspondiente al 26 % del total de la red. El diámetro con menor longitud es el de 200 mm con una longitud de 2.60 km y un porcentaje del 3% del total de la red como se muestra en la Figura 9.

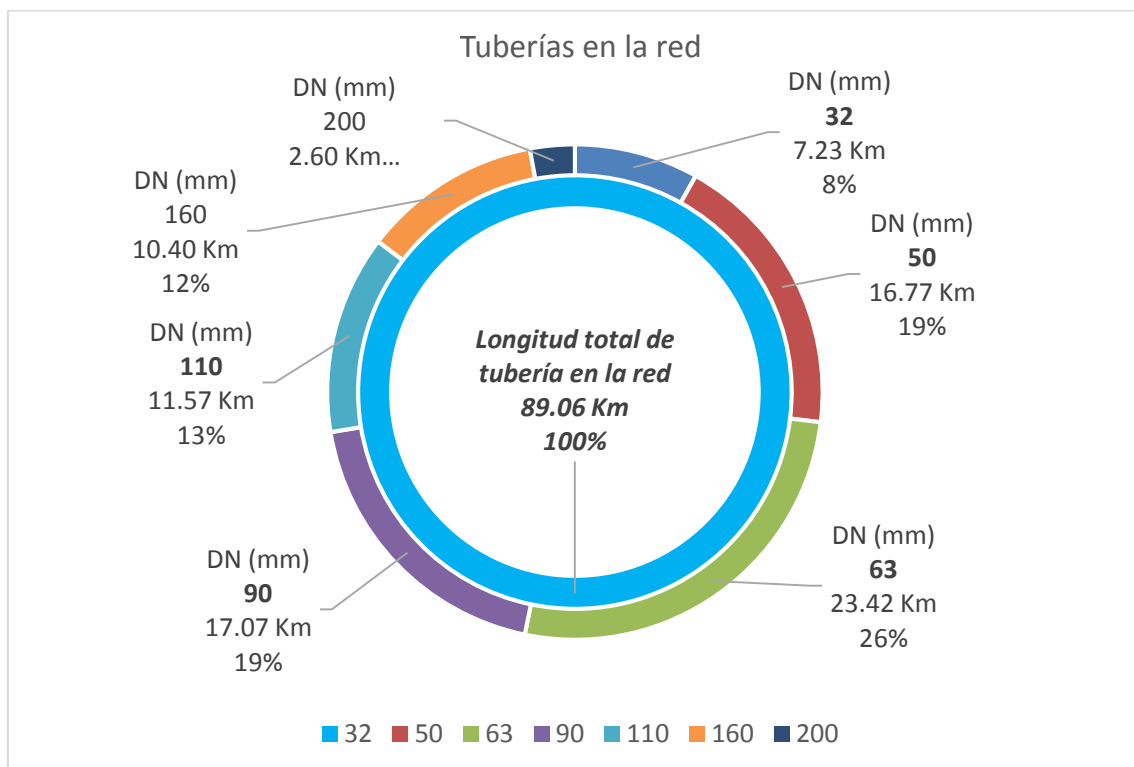


Figura 9 Resumen de diámetros Red Pujilí.

## 2.9 BALANCE HÍDRICO

La Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de Pujilí (EPAPAP), manifiesta que a la salida de cada tanque de alimentación de la red se dispone de contadores generales, de esta manera es posible conocer el agua inyectada en el día. A continuación se presenta un balance hídrico que pretende determinar el % de agua que está siendo consumida por los usuarios.

### 2.9.1 VOLUMEN DE AGUA INYECTADA

De la información entregada por la empresa EPAPAP, se puede establecer el siguiente resumen (Tabla 4). Cabe indicar que la información mostrada corresponde al mes de agosto del 2018 ya que manifiestan no poseer más registros, como el presente trabajo es netamente académico se procedió a trabajar con la mencionada información.

Tabla 4 Información de Volúmenes EPAPAP

Datos de EPAPAP	
V inyectado (m <sup>3</sup> /mes)	164,475
V facturado (m <sup>3</sup> /mes)	92,767
V perdido (m <sup>3</sup> /mes)	71,708

### 2.9.2 RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO

Con la información aportada por la empresa, se estima el rendimiento volumétrico para el mes de trabajo. Se ha considerado que “El rendimiento volumétrico de una red o de un sector de la misma, se define como la relación entre el volumen registrado y el volumen total aportado en un mismo periodo de referencia” (Cabrera, et al., 1996).

$$n_v = \frac{V_{Reg}}{V_{Total}} \quad (1)$$

“La comparación de dicho volumen perdido con el volumen total aportado es el ratio denominado nivel de pérdidas que, se expresa como un porcentaje” (Cabrera, et al., 1996).

$$Nivel\ de\ pérdidas = \frac{Volumen\ perdido}{Volumen\ total} \times 100 \quad (2)$$

Con el fin de estimar el rendimiento volumétrico de la red de la ciudad de Pujili, se procede a realizar el cálculo correspondiente para lo cual se utiliza la ecuación (1), esto permite conocer la eficiencia de la red (Tabla 5), por otra parte también es importante determinar el porcentaje de las fugas de la red para lo cual se aplica la ecuación (2).



Tabla 5 Balance de la red existente

Datos de la red existente		
V inyectado (a)	164,475	m <sup>3</sup> /mes
V consumido, autorizado y facturado (b)	92,767	m <sup>3</sup> /mes
V consumido, autorizado y no facturado (c)	27,716	m <sup>3</sup> /mes
V de fugas (d)= a-(b+c)	43,991	m <sup>3</sup> /mes
% Fugas (f)= d/a*100	26.75	%
% Rendimiento de la red (g)= b/a *100	56.40	%

Es importante matizar que por la falta de información del Volumen consumido, autorizado no facturado se procedió a estimarlo. Una vez realizado los cálculos se puede visualizar que la red de la ciudad de Pujilí tiene un rendimiento volumétrico de 56.40 % y un porcentaje de fugas de 26.75 % (Tabla 5).

### 2.9.3 MODULACIÓN DE LA DEMANDA

El consumo del agua en la ciudad de Pujilí varía a lo largo del día, por lo que es necesario contar con una curva de modulación horaria, la misma depende de costumbres, estatus social y clima. Para el desarrollo del trabajo, la empresa de agua no proporcionó información sobre la modulación horaria de la demanda, por ello se procedió a consultar las curvas de modulación de varias ciudades que poseen las mismas características climatológicas, ya que están ubicadas en la zona centro de Ecuador, se tomó un dato promedio como se muestra en la Figura 10.

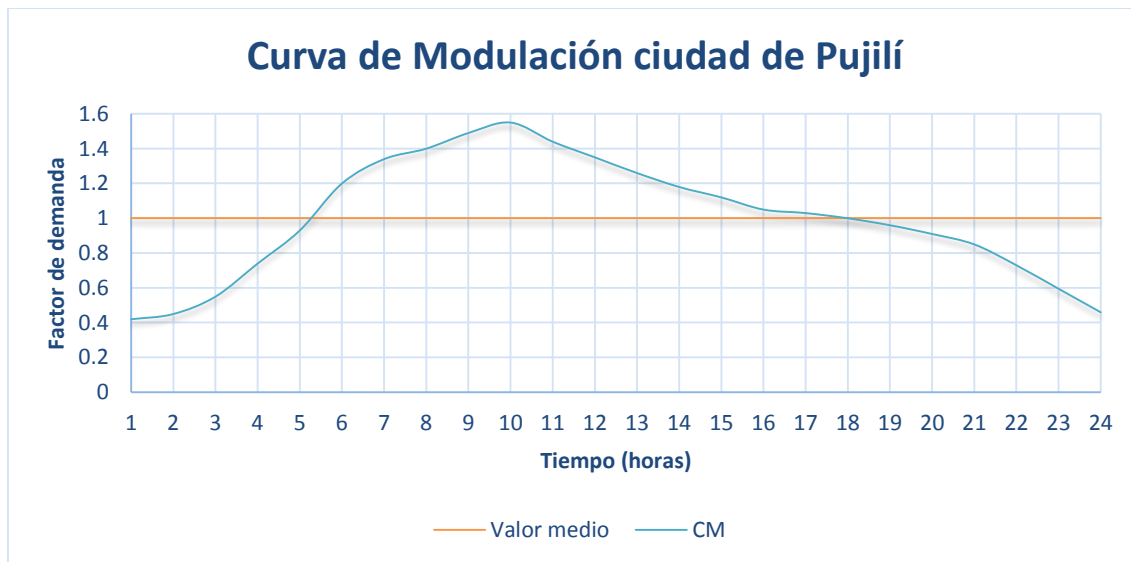


Figura 10 Curva de modulación para 24 horas

En la Figura 10 se puede observar que la hora de mayor consumo aproximado se origina a las 10 de la mañana, que corresponde a la hora de mayor actividad doméstica en la ciudad de Pujilí, así mismo el período de menor consumo se da en horas de la madrugada específicamente a las 1 am.

### 3. MODELO MATEMÁTICO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE PARA LA CIUDAD DE PUJILÍ – ECUADOR

#### 3.1 ETAPAS DE LA ELABORACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

A continuación se presenta un diagrama de las etapas a seguir para la elaboración del modelo matemático de la ciudad. Se partirá de la información inicial sobre el trazado de la red, posteriormente se convertirán las líneas en tuberías, para a continuación realizar la asignación de cotas a cada nudo (trabajando con las curvas de nivel como dato inicial), y finalmente, se asignaran los diámetros a las tuberías, así como sus características principales (como es el material que para el presente proyecto es PVC).

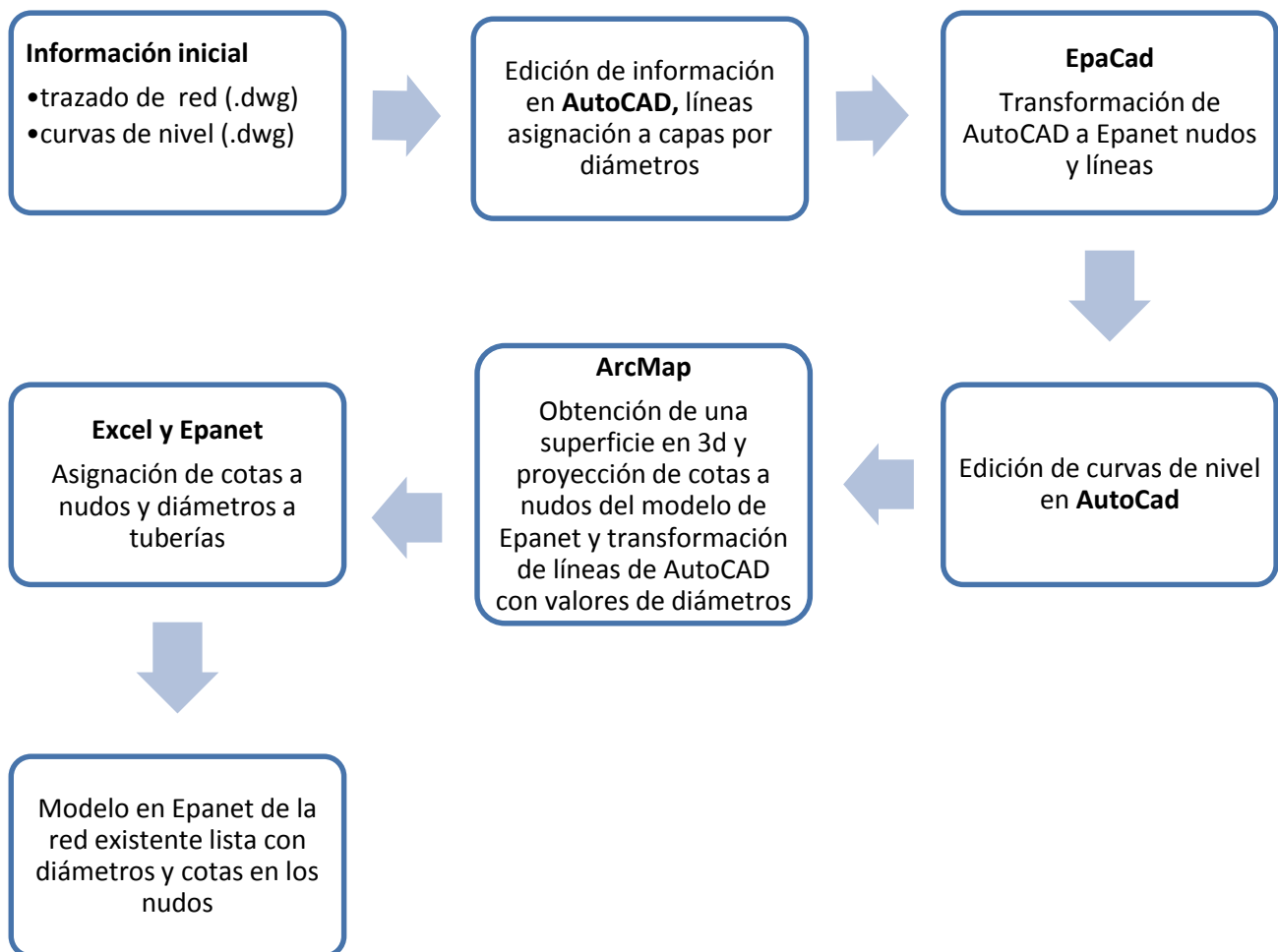


Figura 11 Etapas de la elaboración del Modelo

### 3.1.1 INFORMACIÓN INICIAL

Se trabajara con el levantamiento de la red existente, para lo cual se usara los programas computacionales como: Autocad, Epcad, Arcgis 10.1 y Epanet 2.0. Así mismo, la empresa EPAPAP, proporcionó la información disponible de la red de distribución de agua de la ciudad, así como la topografía en formato .dwg.

### 3.1.2 PROCEDIMIENTO PARA CREAR EL MODELO DE LA RED EXISTENTE

#### *Obtención de tuberías con sus diámetros*

Una vez revisada la información inicial de la red (ejemplo Figura 8) se visualizó que existen líneas que representan las tuberías dentro de la planimetría de la ciudad. En el archivo aportado por la empresa se tiene información de nudos, accesorios, ubicación de las plantas de tratamiento de potabilización, tanques de almacenamiento y la sectorización de la red, también es importante verificar si ésta información esta georreferenciada, esto es posible con la ayuda de las coordenadas geográficas de la ciudad.

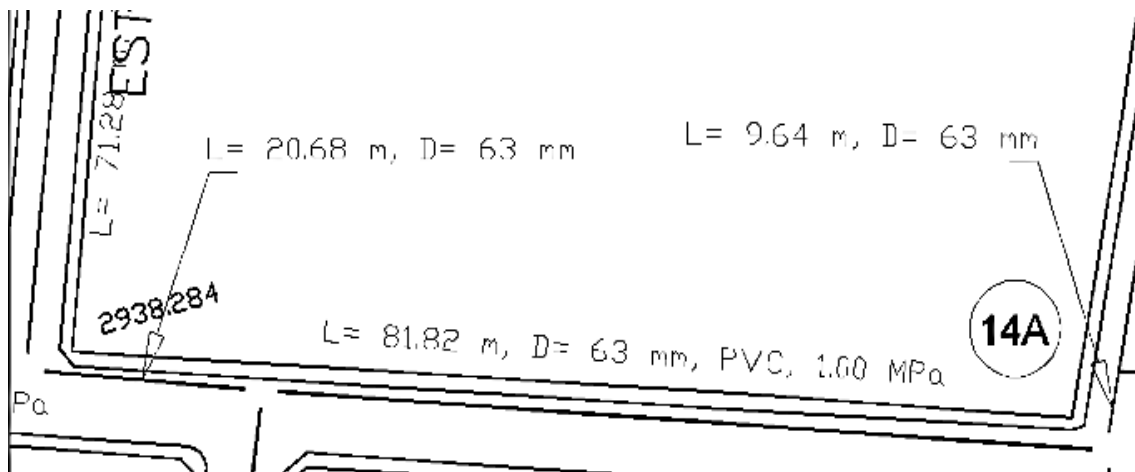


Figura 12 Dibujo de la red existente.

En el plano proporcionado se tiene líneas que representan las tuberías existentes, junto con su información básica (el material, diámetro nominal del tubo y longitud). Con esta información se realiza la edición en AutoCad, creando capas con el nombre de cada uno de los diámetros nominales presentes, luego se asigna a cada capa la línea con el diámetro nominal correspondiente tal como se puede visualizar a continuación.



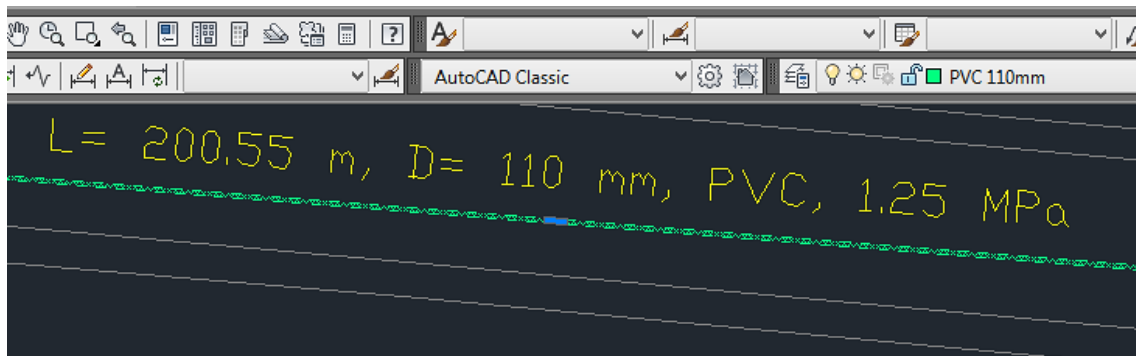


Figura 13 Datos de la tubería existente y capa del diámetro.

Una vez se cuenta con el total de las líneas en las capas que le corresponde a cada diámetro, se simplifica el dibujo manteniendo solo las líneas que representan las tuberías, exportando posteriormente el archivo a .dxf para proceder a su edición (ver la Figura 14).

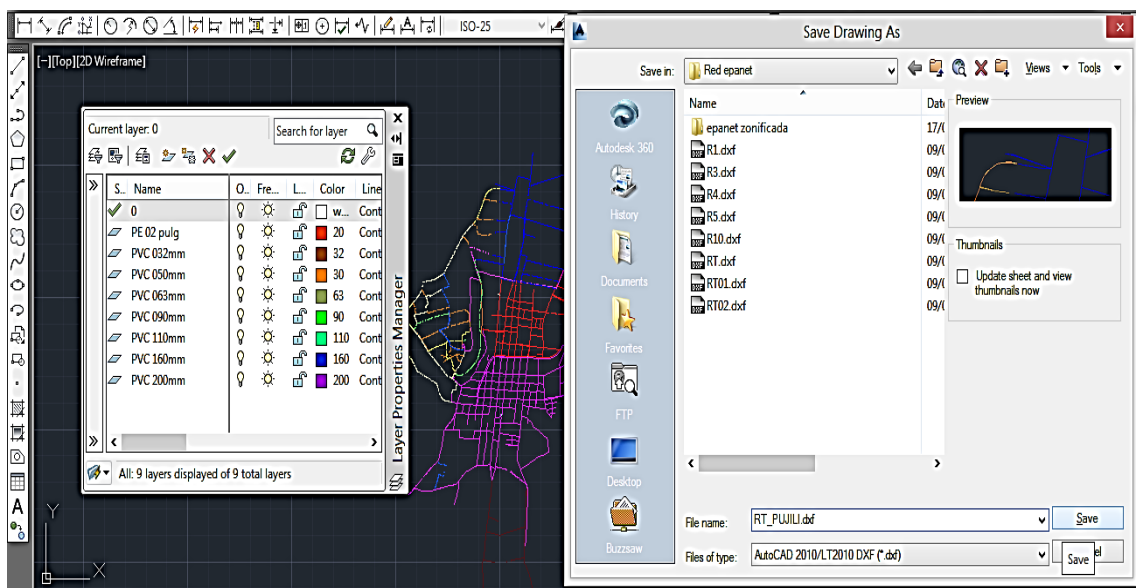


Figura 14 Red existente solo tuberías en formato .dxf.

### 3.1.2.1 Obtención de los nudos de la red existente

Con ayuda del EpaCAD se procede a transformar las líneas en tuberías para Epanet, en donde se selecciona el archivo .dxf guardado con anterioridad para iniciar el proceso. Es necesario recordar que EpaCAD solo lee archivos en éste formato. Una vez que cargado el archivo de la red, EpaCAD muestra las capas que contiene, y es posible seleccionar todas las que almacenan las líneas con los diámetros nominales, además es importante definir la tolerancia que el programa considerará al momento de unir 2 o más líneas para formar un nudo como se observa en la Figura 15.

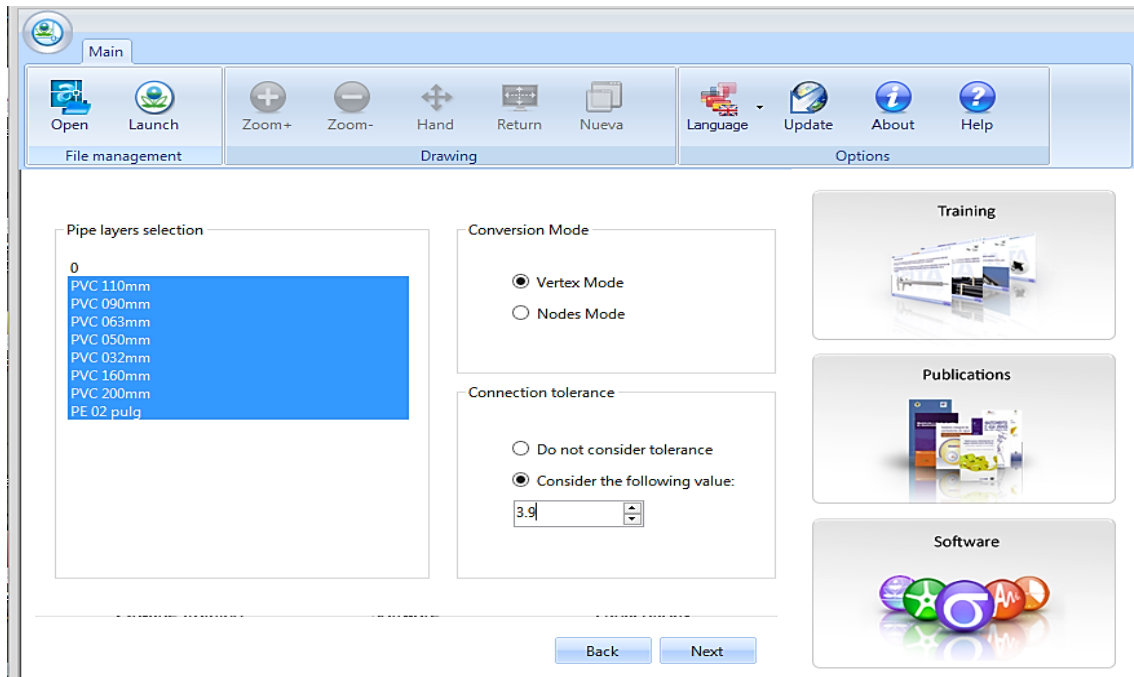


Figura 15 Selección de capas y definir tolerancia en EpaCad.

Posteriormente se asigna la ruta en donde queremos que se guarde el archivo creado por EpaCAD con su respectivo nombre que lo identifique. Con ayuda de Epanet 2.0 se procede a visualizar la red creada, para exportar el plano a un formato .dxf. Esto se realiza con la ayuda de la herramienta exportar de Epanet ver Figura 16.

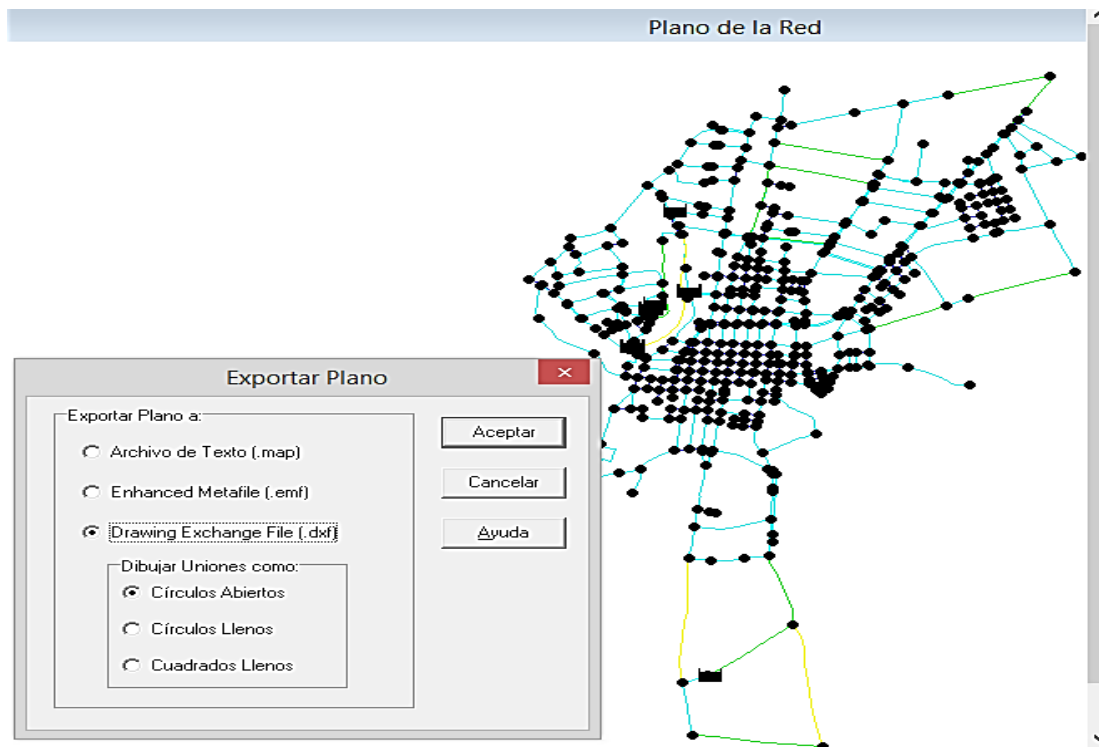


Figura 16 Exportar en formato .dxf red de Epanet

Con el programa Autocad es posible abrir el archivo del plano de la red exportada desde Epanet en formato .dxf, seleccionar todos los elementos y realizar las modificaciones pertinentes (ver Figura 17).

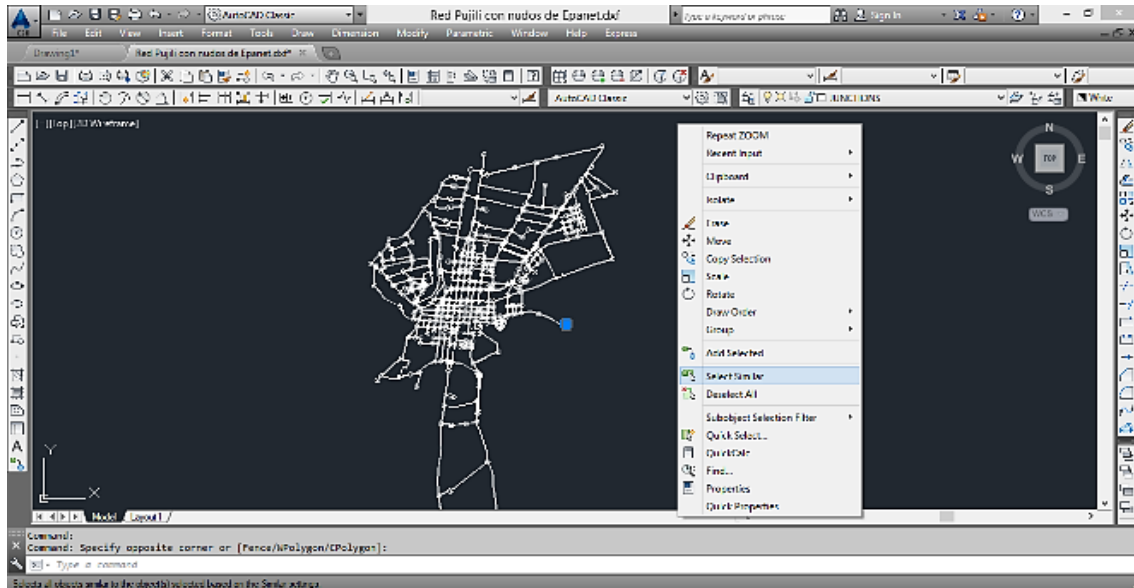


Figura 17 Visualizar red en Autocad y copiar solo nudos.

Otro aspecto importante al momento de pegar los elementos seleccionados, en este caso nudos, es tener la precaución de hacerlo con coordenadas de origen ya que para poder procesar en ArcMap deben estar con coordenadas geográficas del lugar de estudio (ver Figura 18). El nuevo fichero creado se puede guardar con formato .dxf para poder trabajar en el programa ArcMap. Esto simplificará en gran medida la edición de algunas de las propiedades de los elementos del modelo.

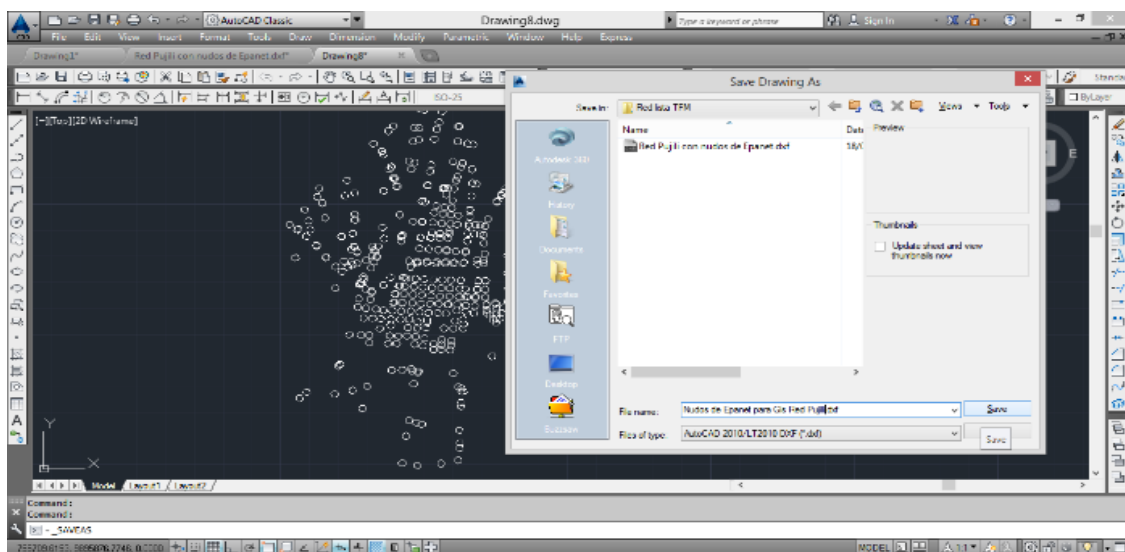


Figura 18 Copiar y pegar con coordenadas de origen nudos y guardar en .dxf

En resumen, hasta este punto ya se obtuvo las tuberías de la red que fue editada en Autocad y guardada en formato .dxf y con ayuda de Epcad y Epanet. También se tiene los nudos en formato .dxf (esta información es compatible con ArcMap), razón por la cual se procedió a trabajar con mencionado programa. Una vez en ArcMap, es posible asignar de forma sencilla las cotas a los nudos y los diámetros a las tuberías.

### 3.1.2.2 Asignación de cotas a nudos

Uno de los problemas más comunes al momento de realizar un modelo de una red es la asignación de cotas a los nudos ya que la falta de herramientas para este propósito dificulta y lo hacen muy laborioso.

Como se ha comentado, con ArcMap se simplifica en gran medida la edición de propiedades de los elementos. Para ello, se asigna el sistema de proyección Geográfica del área de estudio, la cual está ubicada en **WGS 1984 UTM Zona 17 S** ya que se corresponden con las de la ciudad de Pujilí (Figura 19).

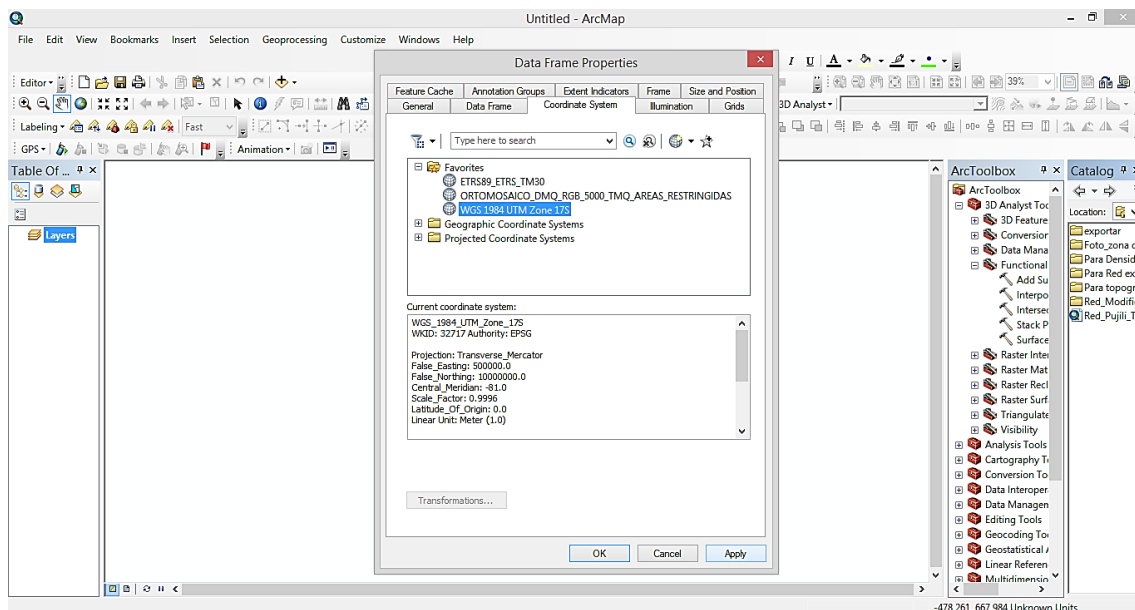


Figura 19 Creación hoja de trabajo en ArcMap y definir proyección Geográfica.

También al archivo que contienen los nudos de la zona de estudio, se asigna el sistema de proyección geográfica y se arrastra al área de trabajo de ArcMap, esto facilita trabajar al momento de relacionar la información de nudos y curvas de nivel (ver Figura 20).

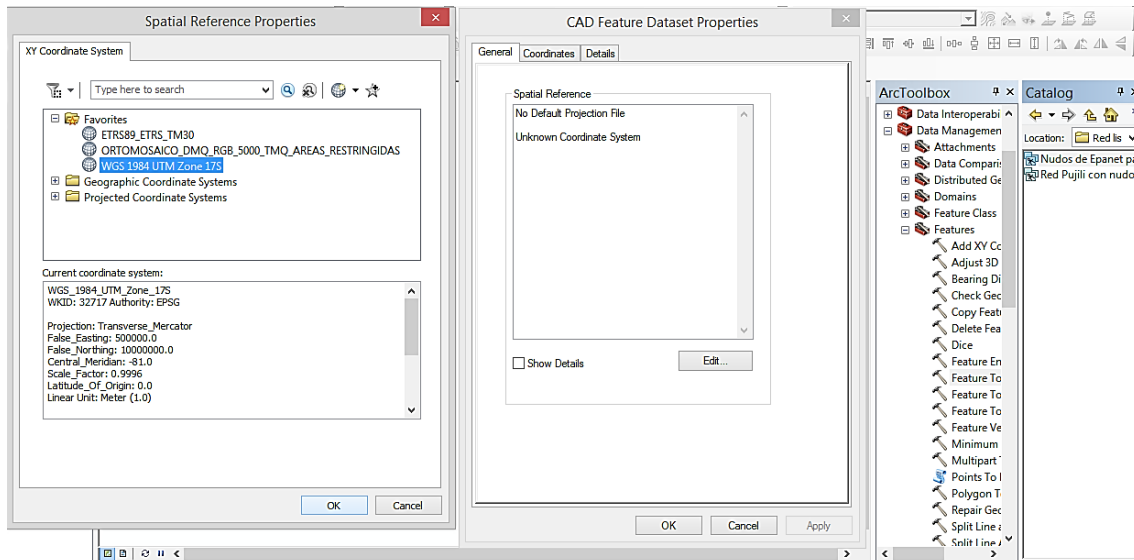


Figura 20 Definir el sistema de proyección geográfica de nudos y tubos de red.

Una vez cargada la información de nudos en ArcMap, es importante transformarlo en formato compatible con mencionado programa como es .shp, esto se consigue con la ayuda de las herramientas propias del programa (Figura 21).

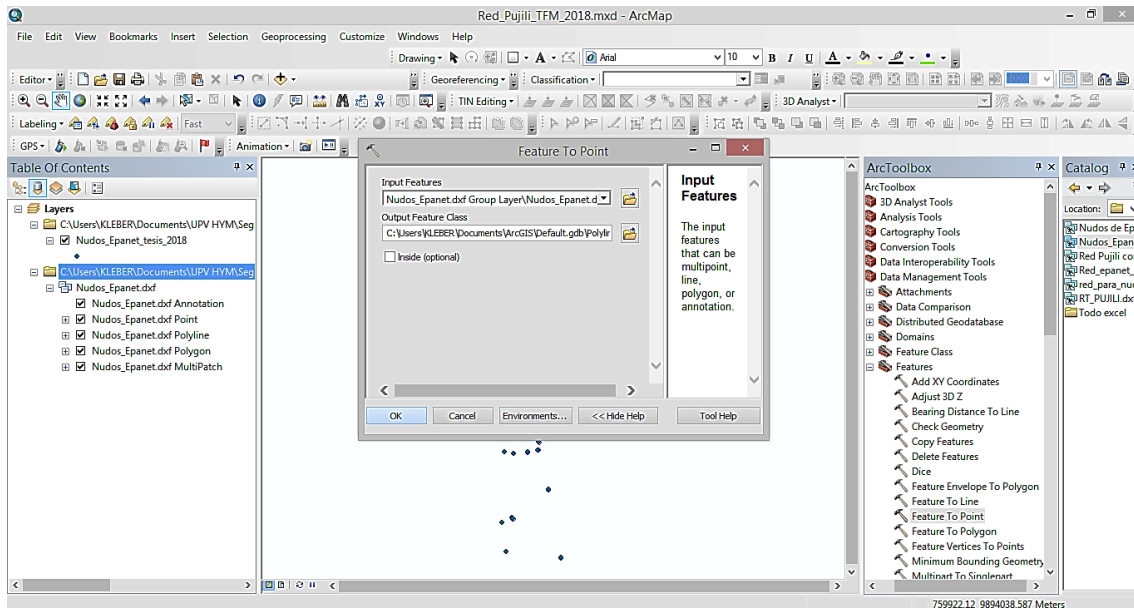


Figura 21 Transformación de formato .dxf a .shp en ArcMap.

Tras la transformación de los nudos en formato .shp, se procede a visualizar la tabla de atributos en el cual se genera nuevas columnas para almacenar las coordenadas x, y, Z. Esta última corresponde a la cota (Figura 22). En el caso de la información de las coordenadas x e y, basta con pedir el reporte de esta información en el programa y se



obtienen los datos de estas columnas. En el caso de la columna cota, éste procedimiento es algo más complejo, tal como se describe a continuación.

FID	Shape	Entity	Layer	Color	Linetype	Elevation	LineWt	RefName	ORIG_FID	X	Y	Cota
0	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		1	755754	0	0
1	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		2	755711.8125	0	0
2	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		3	755625.625	0	0
3	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		4	755698.5	0	0
4	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		5	756116.1875	0	0
5	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		6	756157.3125	0	0
6	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		7	756875.5	0	0
7	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
8	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
9	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
10	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
11	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
12	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
13	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
14	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
15	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
16	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
17	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
18	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
19	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
20	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
21	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
22	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
23	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
24	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
25	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25				0	0
26	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		27	75722.625	0	0
27	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		28	756943.125	0	0
28	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		29	755959.0625	0	0
29	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		30	755956.625	0	0
30	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		31	756110.75	0	0
31	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		32	756100.1875	0	0
32	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		33	756163.6875	0	0
33	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		34	756236.6875	0	0
34	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		35	756174	0	0
35	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		36	756057.25	0	0
36	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		37	756092.3125	0	0
37	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		38	756201.75	0	0
38	Point	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	0	25		39	756264.1875	0	0

Figura 22 Añadir nuevas columnas para calcular coordenadas y cota del nudo.

Una vez que se generó los archivos .shp es necesario borrar la información .dxf de la hoja de trabajo del ArcMap para evitar confusiones. Posteriormente se debe verificar la identificación de los nudos tanto en ArcMap y Epanet, ya que de esto depende el éxito del proceso de asignación de cotas. Para ello, se usó las etiquetas de los nudos en ambos programas y se visualizó el siguiente resultado (ver Figura 23) dando positivo la identificación de los elementos.

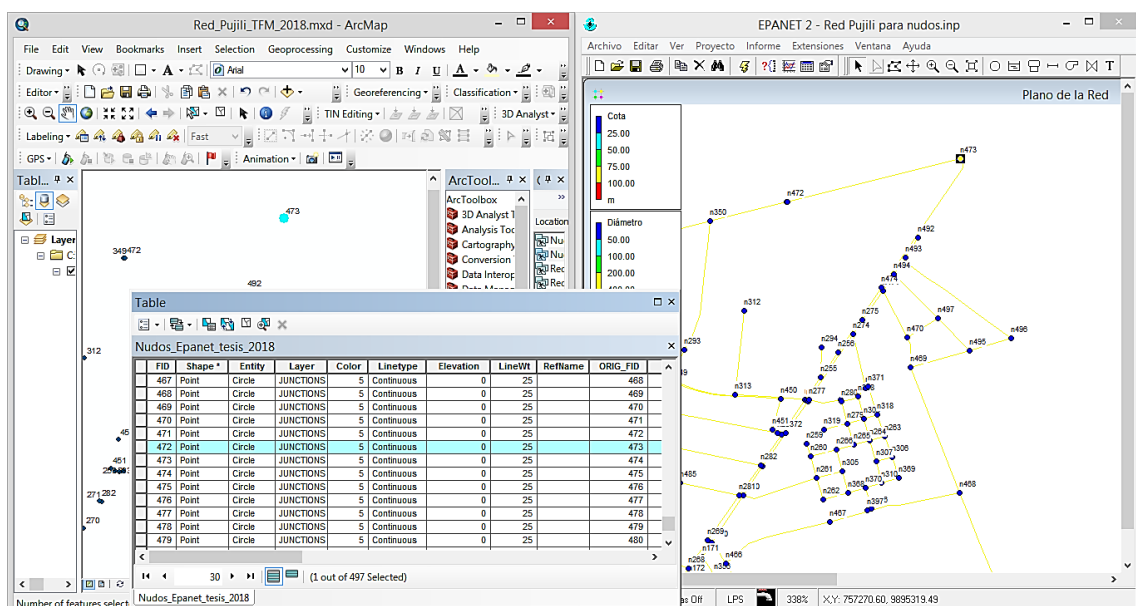


Figura 23 Verificación de la correspondencia de nudos en ArcMap y Epanet.

Es importante aclarar que la identificación de los nudos en ArcMap que es similar a la realizada en Epanet; se encuentra en la columna **ORIG\_FID** de la tabla de atributos. En resumen, se ha conseguido asignar a los nudos coordenadas en x e y. Toda esta información esta georreferenciado; para poder obtener las cotas es necesario tener una superficie 3D en ArcMap, para esto es necesario las curvas de nivel del área del proyecto.

- **Procesamiento de las curvas de nivel**

En la documentación otorgada por la empresa EPAPAP, en el archivo topografía de la ciudad (.dwg ) se tiene las curvas de nivel como polyline, mismas que entre sus propiedades contiene la elevación (ver Figura 24). Este archivo se guarda en formato .dxf para procesar en el programa ArcMap.

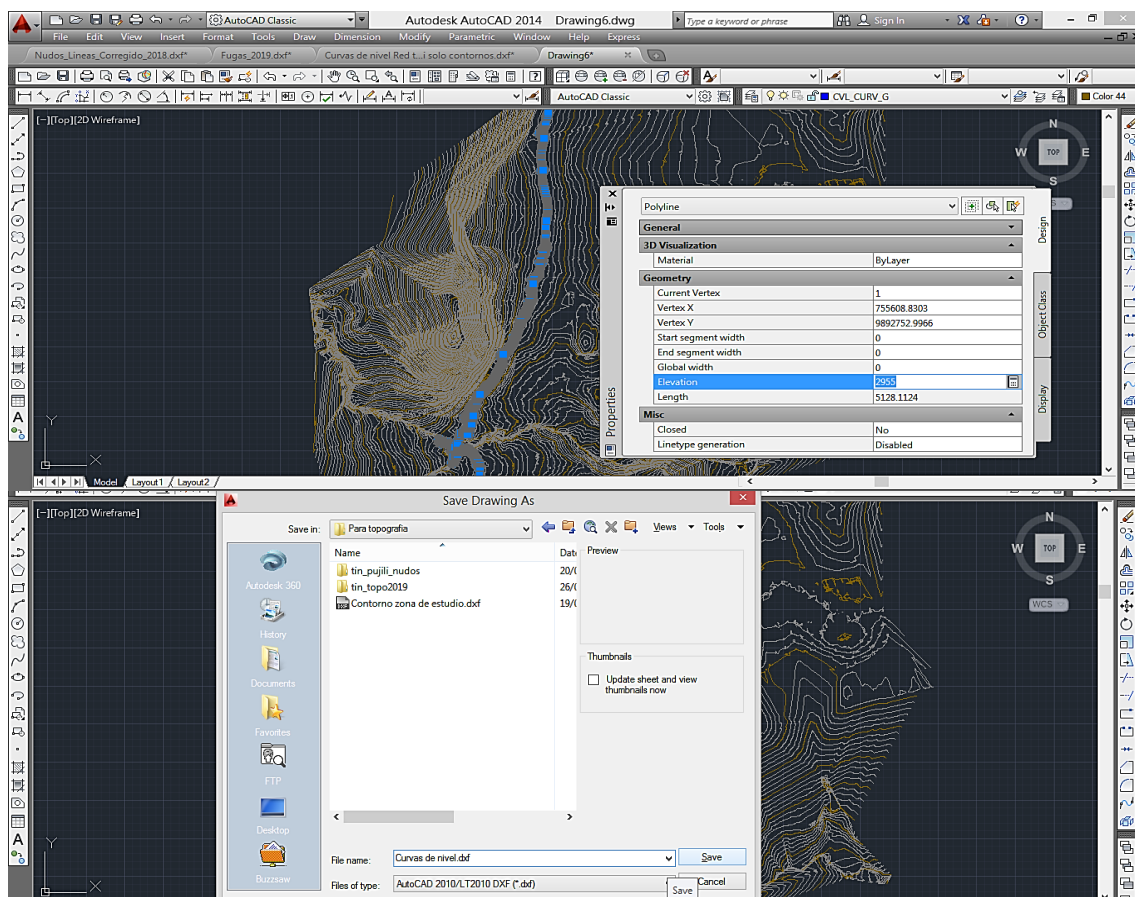


Figura 24 Curvas de nivel en polyline y guardar en .dxf.

En ArcMap se asigna el sistema de proyección geográfica al archivo que contiene las curvas de nivel, a continuación se traslada a la zona de trabajo del programa, para posteriormente convertirlo en un formato compatible, como es (.shp), para poder procesar la información (ver Figura 25).



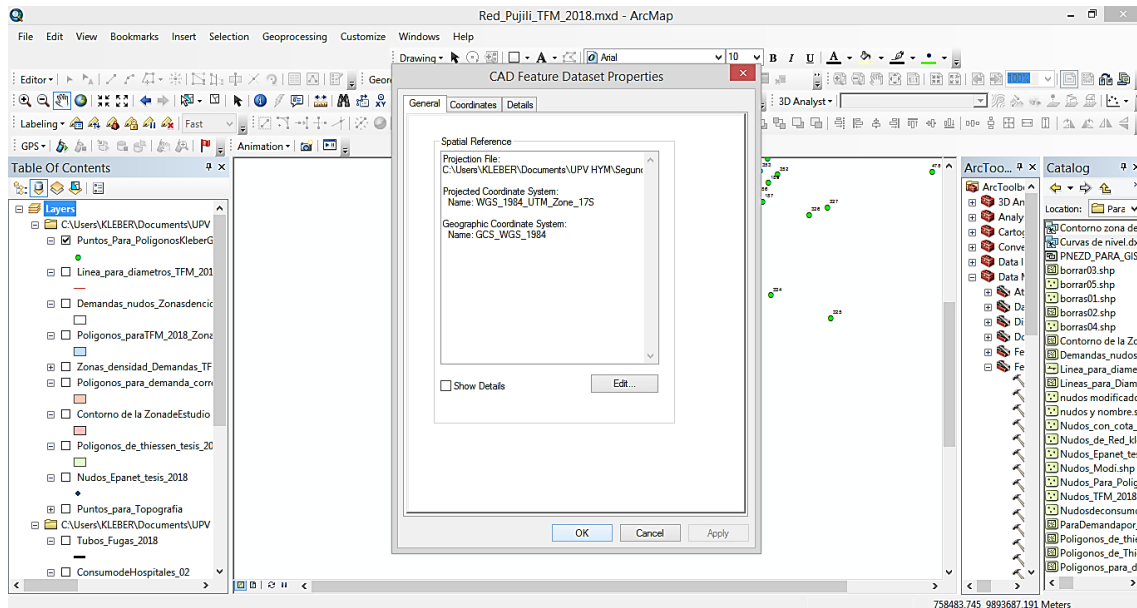


Figura 25 Asignación de Sistema de proyección geográfica a curvas de nivel.

Es necesario aclarar que el archivo .dxf que contiene las curvas de nivel, debe contener entre sus atributos la propiedad de altitud, para que en el momento de la transformación no se generen errores ( Figura 26).

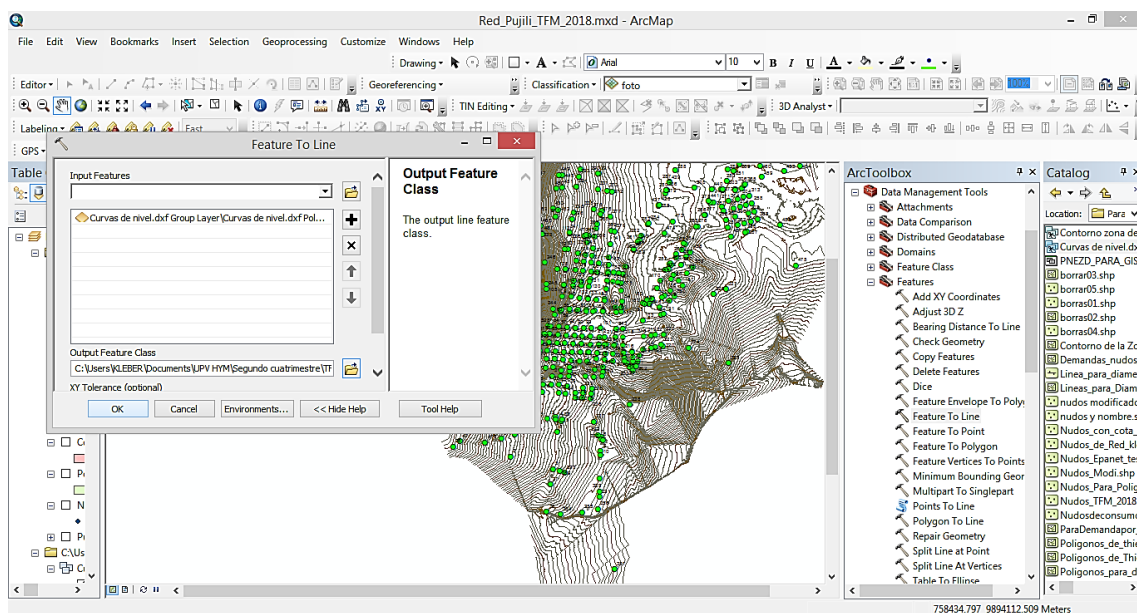


Figura 26 Convertir curvas de nivel de formato .dxf a .shp.

Una vez terminada la transformación debe revisarse la tabla de atributos de la capa creada, y confirmar que figura la columna elevación con los datos de altitud (ver Figura 27). Esta información se requiere para la creación de un archivo tipo TIN (imagen en 3D) el mismo que sirve para proyectar las cotas a los nudos.

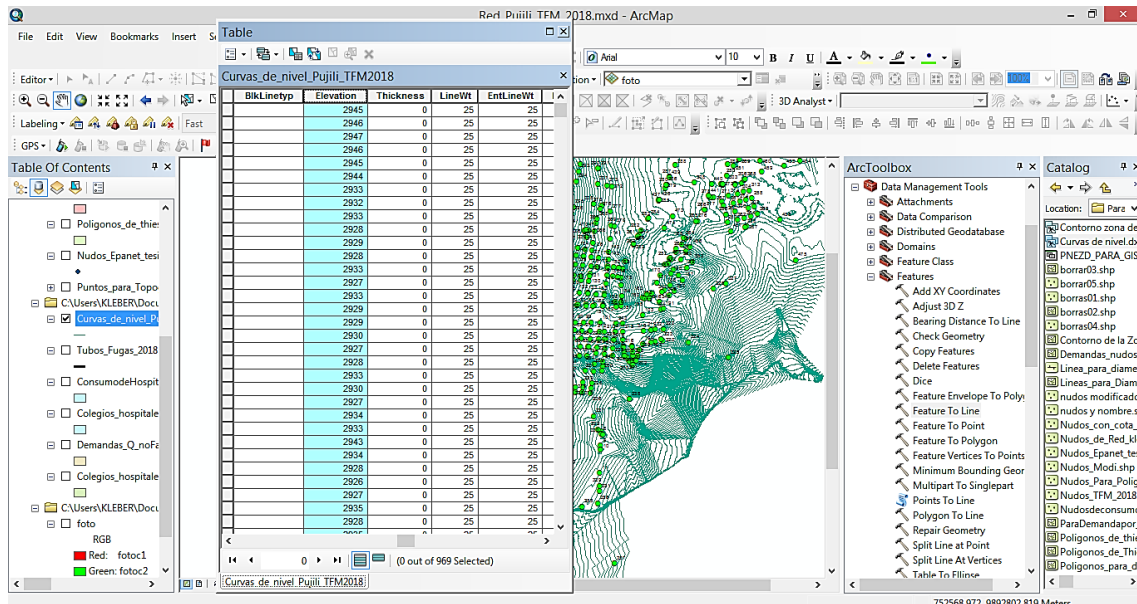


Figura 27 Revisión de propiedades de las curvas de nivel en formato .shp.

Para la creación del archivo TIN (imagen en 3D) se utilizan las herramientas de análisis de 3D del programa ArcMap (ver Figura 28). Es conveniente que las curvas de nivel cubran la totalidad del área del proyecto, en caso contrario quedarían cotas sin asignar.

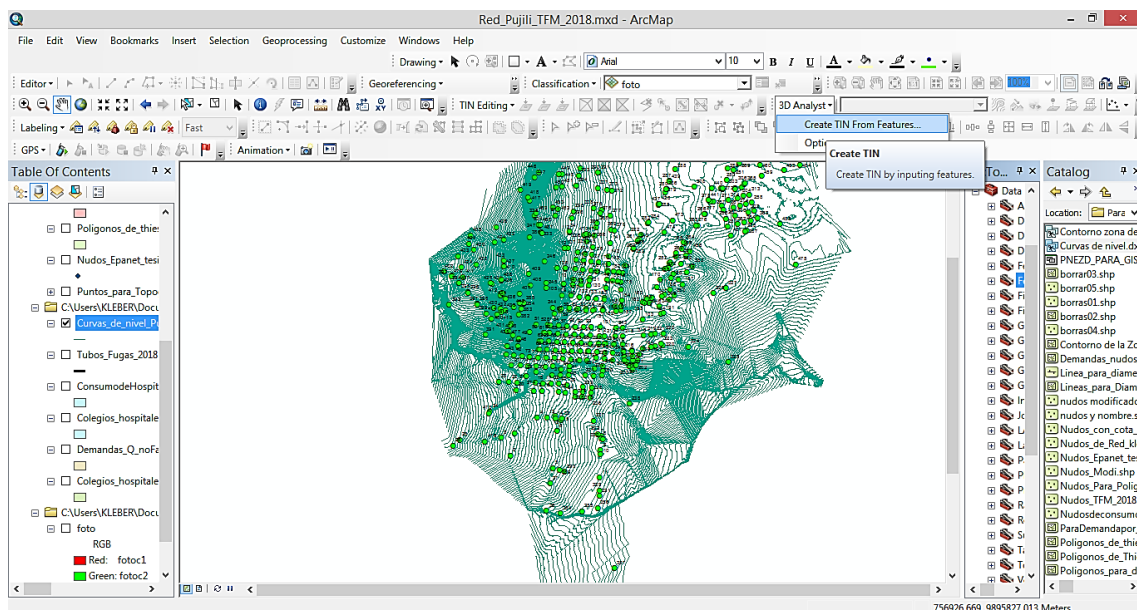


Figura 28 Crear TIN utilizando herramientas de ArcMap.

El procedimiento para la generación del archivo TIN parte de la selección inicial de la capa correspondiente y la columna de la tabla de atributos que contiene la información. Para el proyecto se elige la capa curvas de nivel y la columna elevación de los nodos (Figura 29).

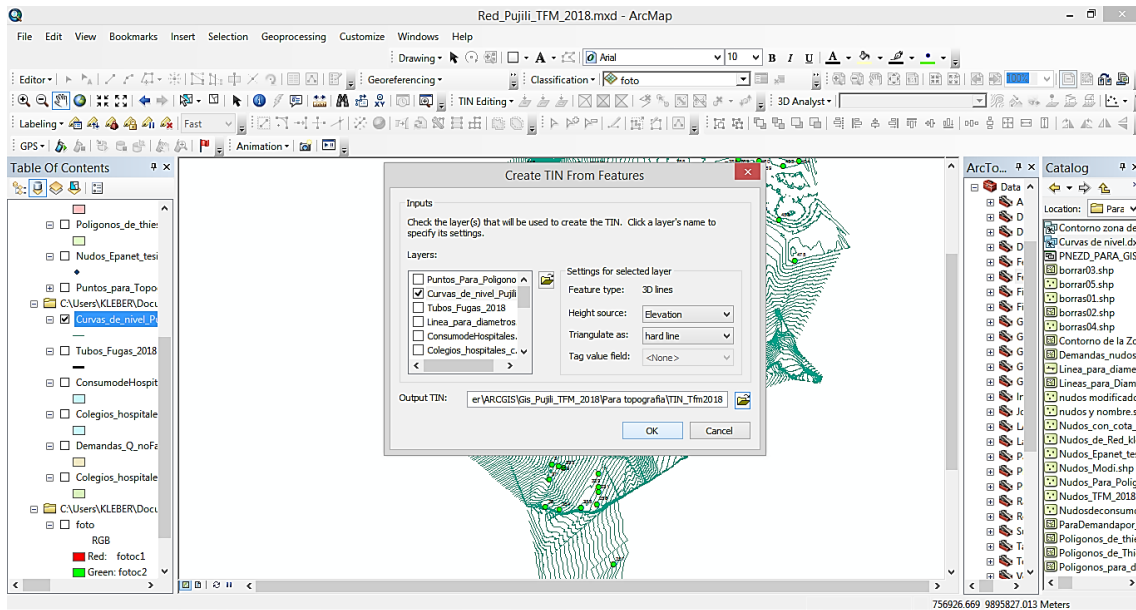


Figura 29 Selección de datos de entrada para crear el TIN, definir campo elevación

La siguiente imagen muestra la superficie 3D obtenida, donde se aprecian las diferentes cotas de terreno gracias a la gama de colores que representa un rango de altura diferente. En esta imagen se detecta de forma sencilla las zonas más elevadas del área de estudio, así como los puntos más bajos (Figura 30).

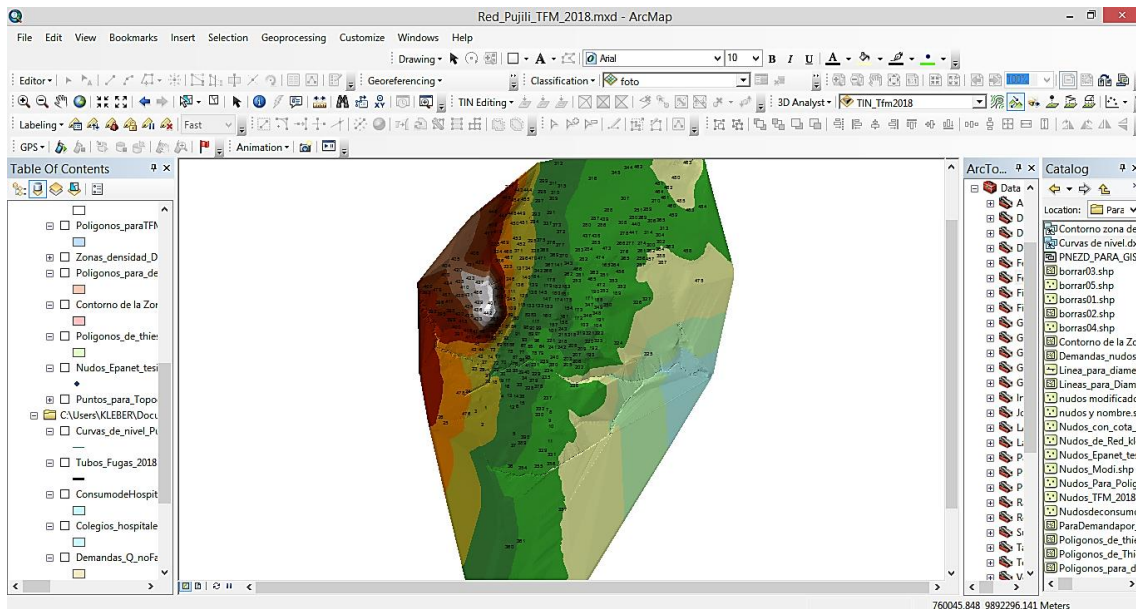


Figura 30 Imagen TIN creada y visualización por coloración las alturas.

Para ilustrar de mejor manera la superficie creada anteriormente se exportó al programa ArcScene, donde es posible asignar una gama de colores de acuerdo a los rangos que más convienen para posteriormente visualizar y proyectar una imagen satelital de la zona de estudio (Figura 31).



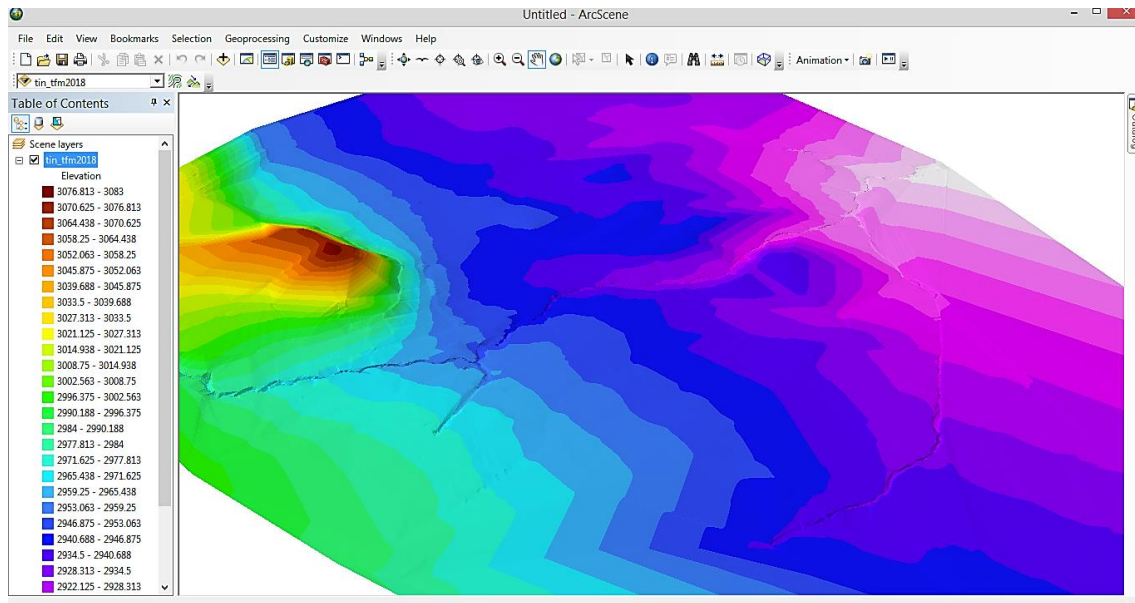


Figura 31 Visualización TIN en 3D de la superficie del proyecto en ArcScene.

A continuación, y con ayuda del programa ArcScene, se proyecta la imagen satelital a la superficie 3D, para una mejor apreciación de la ciudad de Pujilí, identificando así de mejor manera la red, la ubicación de las calles, casas y ríos (Figura 32).

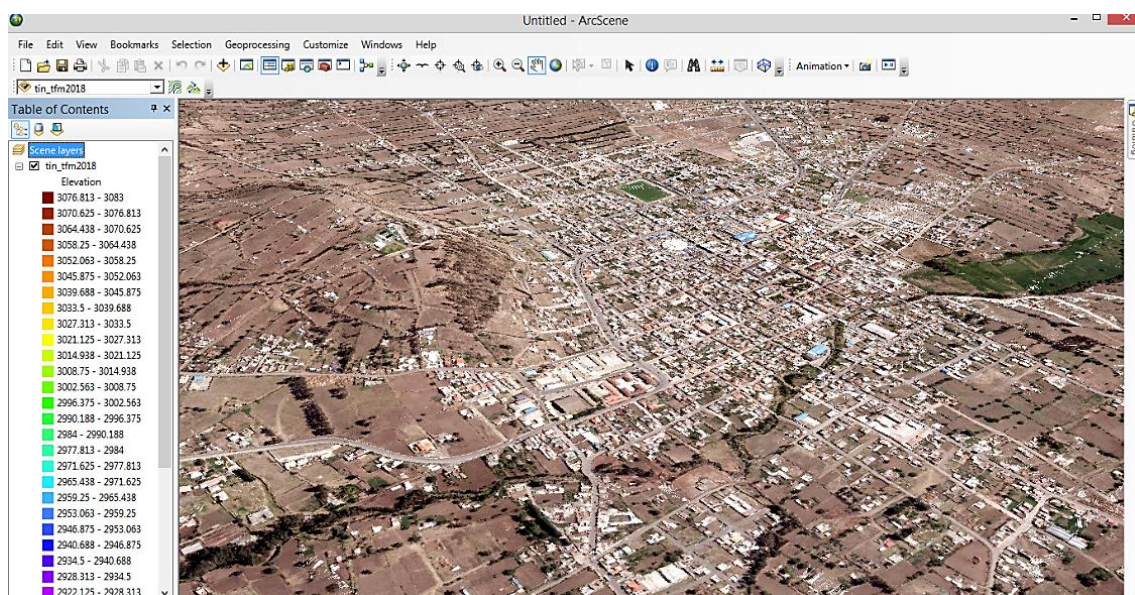


Figura 32 Proyección de la foto satelital a la superficie 3d TIN en ArcScene.

- **Obtención de cotas de los nudos**

Para la interpolación de las cotas de los nudos se utilizan las herramientas del ArcMap, junto con la superficie 3D creada anteriormente. Para este proceso se debe definir la superficie a la cual se va a interpolar, así como el archivo que contiene los nudos (Figura 33).

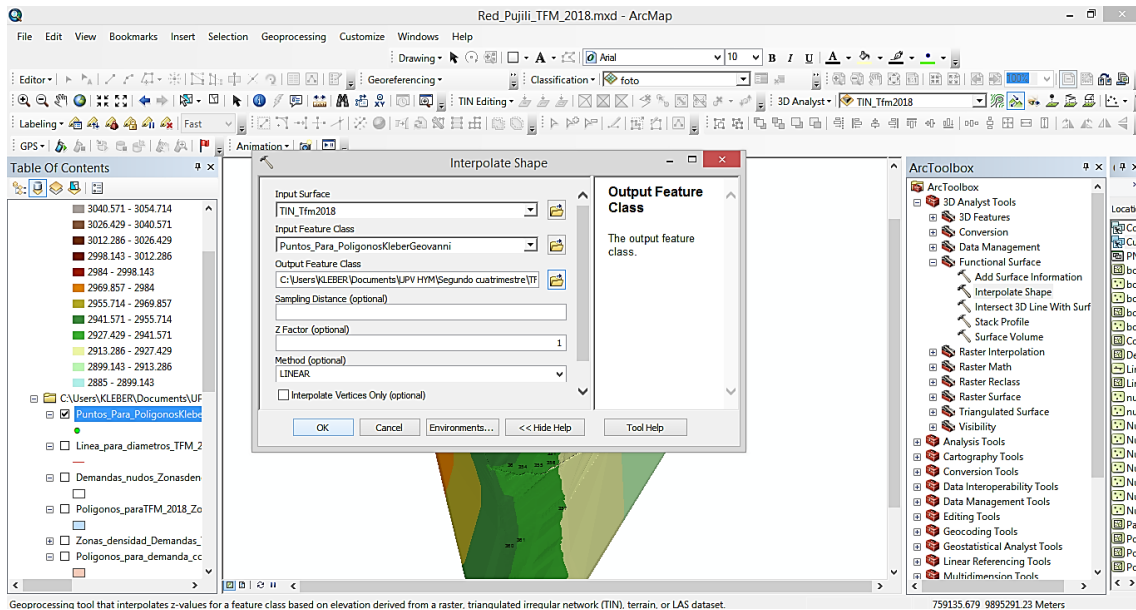


Figura 33 Interpolación de puntos con la superficie creada TIN.

Una vez terminado el proceso de interpolación se debe abrir la tabla de atributos del nuevo elemento creado, y en la columna **Elevación** se procede a calcular la geometría en este caso se elige la coordenada z donde se aloja las cotas proyectadas para cada nudo (Figura 34).

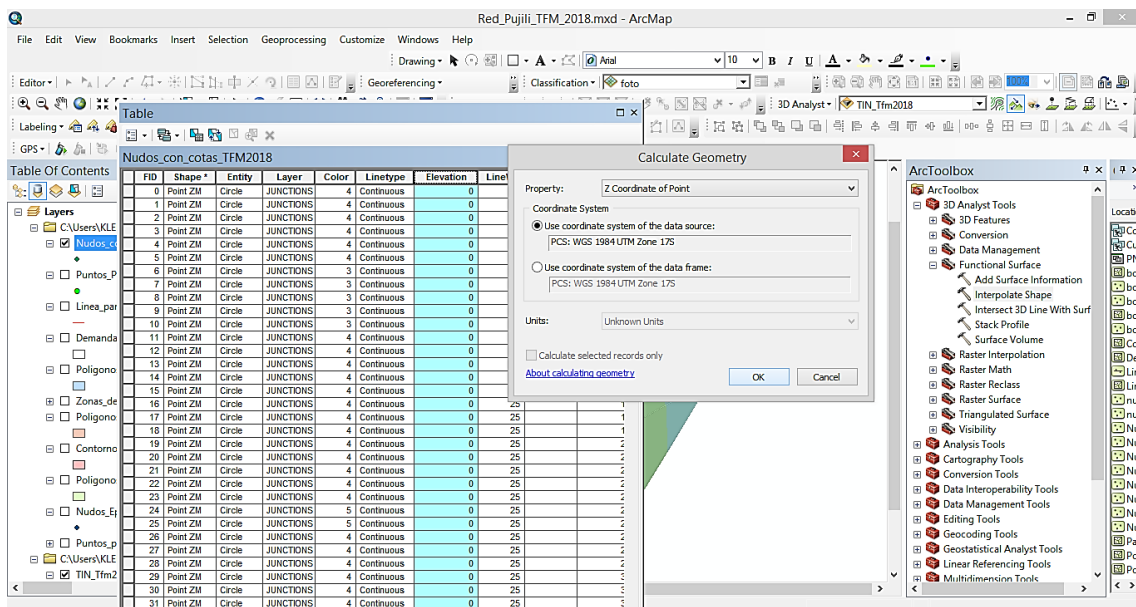


Figura 34 Cálculo de la elevación de cada nudo.

En este punto es necesario aclarar que el nuevo archivo generado al momento de la interpolación mantiene la identificación de los nudos originales (Figura 35), por tanto se puede trabajar con ellos en Epanet al momento de asignar las cotas con el programa Excel.



FID	Shape	Entity	Layer	Color	Linetype	Elevation	LineWt	RefName	ORIG_FID
450	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	2964.200654	25		45
451	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	2967.218282	25		45
452	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2970.858887	25		45
453	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	2962.855273	25		45
454	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	1	Continuous	2968.724854	25		45
455	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2931.850088	25		45
456	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2927.653869	25		45
457	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2927.891689	25		45
458	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2929.544434	25		45
459	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2930	25		46
460	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2930.869629	25		46
461	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2930.171875	25		46
462	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2922.09682	25		46
463	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2930.813232	25		46
464	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2935.856201	25		46
465	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2940.495605	25		46
466	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	4	Continuous	2979.916748	25		46
467	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	4	Continuous	2977.635742	25		46
468	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	4	Continuous	2962.457275	25		46
469	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	4	Continuous	2953.356689	25		43
470	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	4	Continuous	2955.193848	25		43
471	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2936.044189	25		43
472	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2937.957275	25		43
473	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2937.533203	25		43
474	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2926.122314	25		43
475	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	4	Continuous	2972	25		43
476	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	4	Continuous	3015.147949	25		43
477	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	5	Continuous	2974.521484	25		43
478	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	4	Continuous	3009.359619	25		43
479	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2926.713867	25		46
480	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2928.229248	25		46
481	Point ZM	Circle	JUNCTIONS	3	Continuous	2929.82251	25		46

Figura 35 Tabla de atributos cotas en cada nudo.

En resumen, hasta este punto se han obtenido las cotas de cada nudo; a continuación se trabaja en Excel ya que la tabla de atributos de ArcMap es posible exportar al formato Excel, así como también desde Epanet con la herramienta extensiones podemos extraer el archivo que contiene la información de toda la red y trabajarlos en Excel, para la asignación de las cotas a cada nudo.

- **Asignación de las cotas a nudos del modelo**

Para la asignación de las cotas a los nudos del modelo, primeramente se exporta la tabla de atributos que contiene la información desde el programa ArcMap, seleccionando como formato de salida “.dbf” (Figura 36).

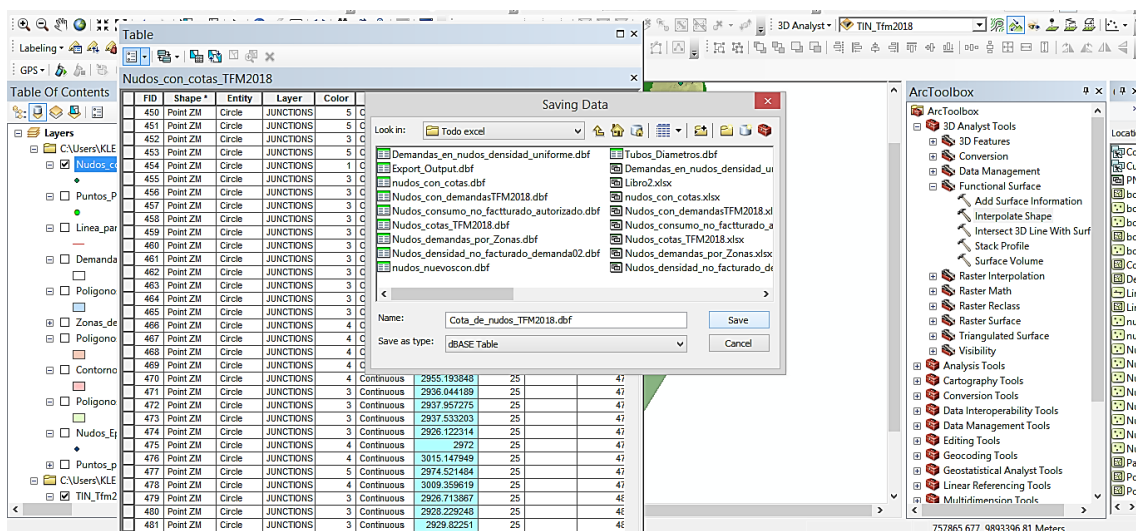


Figura 36 Exportar tabla como .dbf.

Posteriormente se debe exportar la información de la red del programa Epanet, esto se realiza a partir del icono de extensiones ubicado en la barra de herramientas del programa. Este procedimiento permite tener acceso al bloc de notas donde se incluye la información característica de los elementos (estos datos pueden asimismo exportarse a una hoja de trabajo en Excel para su edición (Figura 37).

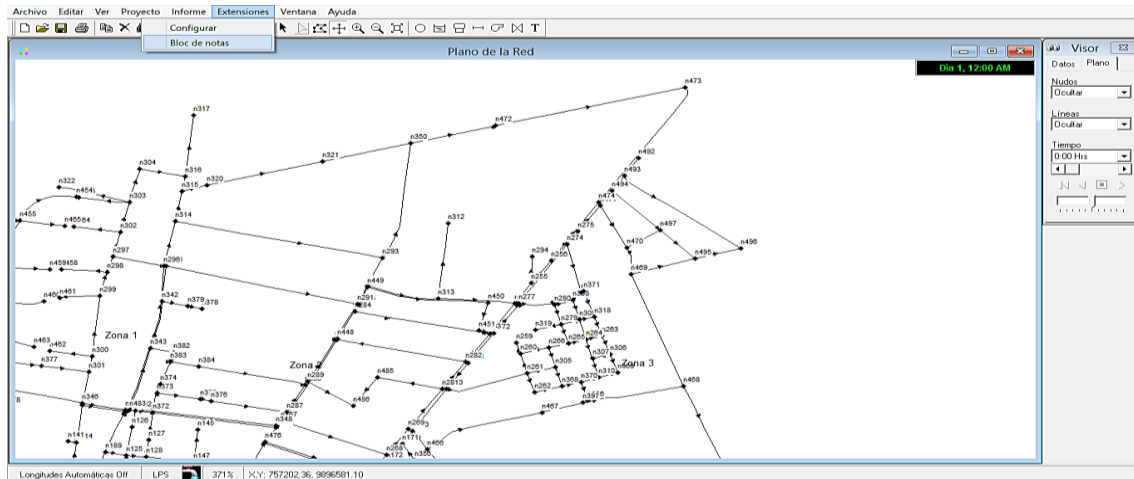


Figura 37 Exportar Información desde Epanet.

Con la información exportada al programa Excel, tanto lo referente a las cotas desde ArcMap y los datos de la red desde Epanet, es posible asignar las cotas correspondientes a cada uno de nudos.

Linea/RefName	ORIG_FID	X	Y	ORIG_FID sin espacios	Cota	ID	ID sin espaci	ID sin caracter	Cota
2	25	755754.0000000000	9893252.0000000000	1	2962.43286133000	n1	n1	1	=BUSCARV(P2;K2:L498;2)
3	25	755711.8125000000	9893041.0000000000	2	2963.32812500000	n2	n2	2	BUSCARV(valor_buscado;matric_buscar_en;indicador_columnas;[ordenado])
4	25	755625.6250000000	9893214.0000000000	3	2966.00000000000	n3	n3	3	2966
5	25	755988.5000000000	9893405.0000000000	4	2956.00000000000	n4	n4	4	2956
6	25	756116.1875000000	9892924.0000000000	5	2948.99291992000	n5	n5	5	2948.99292
7	25	756157.3125000000	9893276.0000000000	6	2950.00000000000	n6	n6	6	2950
8	25	756575.5000000000	9893231.0000000000	7	2936.67480469000	n7	n7	7	2936.674805
9	25	756577.0000000000	9893204.0000000000	8	2936.47827148000	n8	n8	8	2936.478271
10	25	756572.9375000000	9893096.0000000000	9	2936.64526367000	n9	n9	9	2936.645264
11	25	756572.1250000000	9893058.0000000000	10	2937.00000000000	n10	n10	10	2937
12	25	756557.9375000000	9892833.0000000000	11	2935.05664063000	n11	n11	11	2935.056641
13	25	756140.8750000000	9893418.0000000000	12	2950.00000000000	n12	n12	12	2950
14	25	756058.1875000000	9893409.0000000000	13	2952.49389648000	n13	n13	13	2952.493896
15	25	756144.5625000000	9893397.0000000000	14	2950.00000000000	n14	n14	14	2950
16	25	756196.6250000000	9893382.0000000000	15	2947.93090820000	n15	n15	15	2947.930908
17	25	756012.2500000000	9893662.0000000000	16	2955.14624023000	n16	n16	16	2955.14624
18	25	756025.4375000000	9893735.0000000000	17	2953.67700195000	n17	n17	17	2953.677002
19	25	755950.0000000000	9893739.0000000000	18	2955.46826172000	n18	n18	18	2955.468262
20	25	755935.0625000000	9893662.0000000000	19	2957.07592773000	n19	n19	19	2957.075928
21	25	755769.9375000000	9893670.0000000000	20	2962.20556641000	n20	n20	20	2962.205566
22	25	755772.7500000000	9893741.0000000000	21	2960.85644531000	n21	n21	21	2960.856445

Figura 38 Información en Excel edición.

Finalmente se debe trasladar las cotas al modelo de Epanet, esto se realiza mediante la herramienta extensiones. Asimismo, se debe verificar la información asignada, para esto se usa los programas de Excel, Epanet y ArcMap (Figura 39).

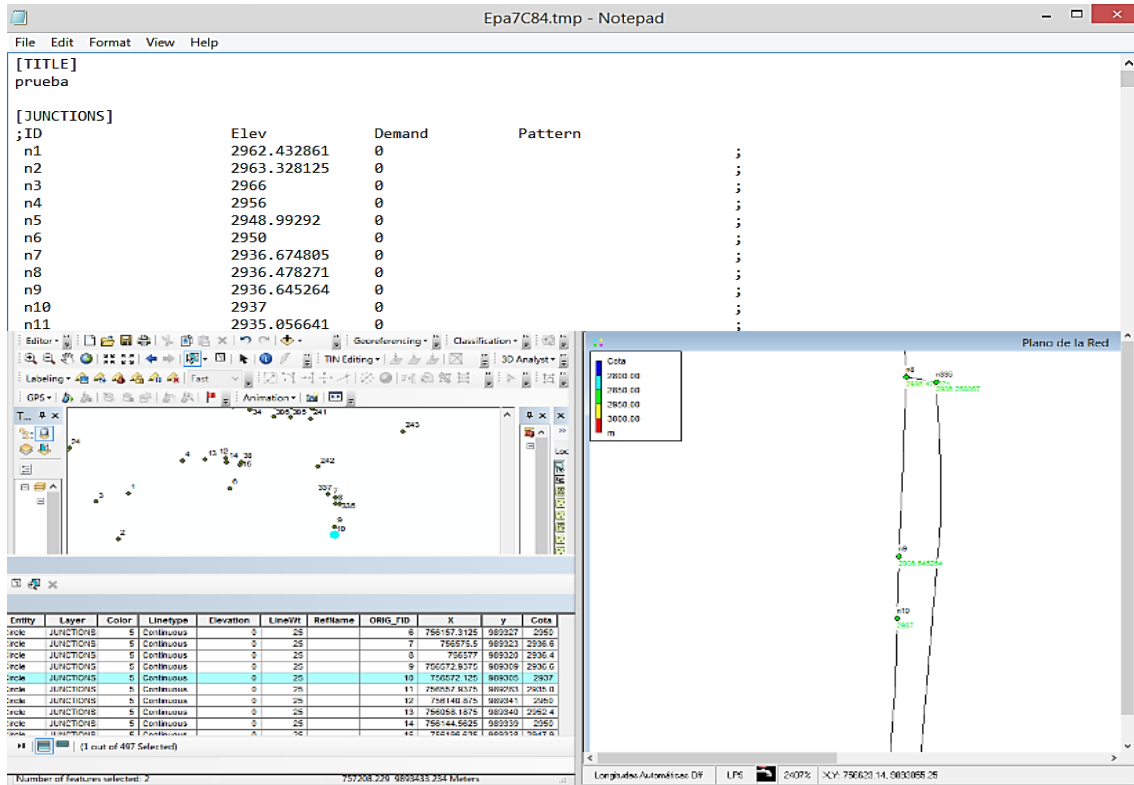


Figura 39 Visualización de cotas de nudos en Epanet y ArcMap.

### 3.1.2.3 Asignación de diámetros a tuberías del modelo

Otro de los problemas al momento de generar un modelo de una red existente, es la asignación de los diámetros a las tuberías en Epanet, la cual usualmente se lo hace línea por línea por lo que el uso del programa ArcMap nos permite hacerlo de manera más fácil y sencilla. Para la asignación de los diámetros a las tuberías se trabaja con el archivo .dxf generado en una fase previa, operando desde el programa ArcMap es posible asignar el sistema de proyección geográfica de la zona (**WGS 1984 UTM Zona 17 S**).

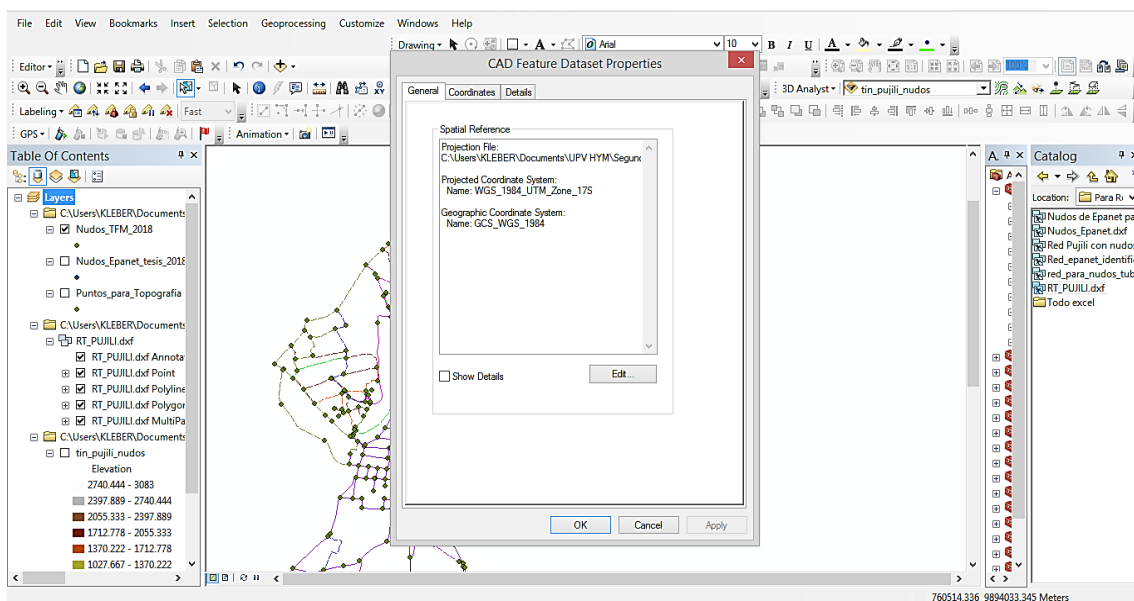


Figura 40 Asignación del sistema de proyección geográfica a tuberías.

El procedimiento siguiente transforma el archivo que contiene las tuberías a un formato “.shp”, haciendo uso de las herramientas de edición del programa ArcMap. Posteriormente se verifica que la identificación de las tuberías en ArcMap coincida con la de Epanet (Figura 41).

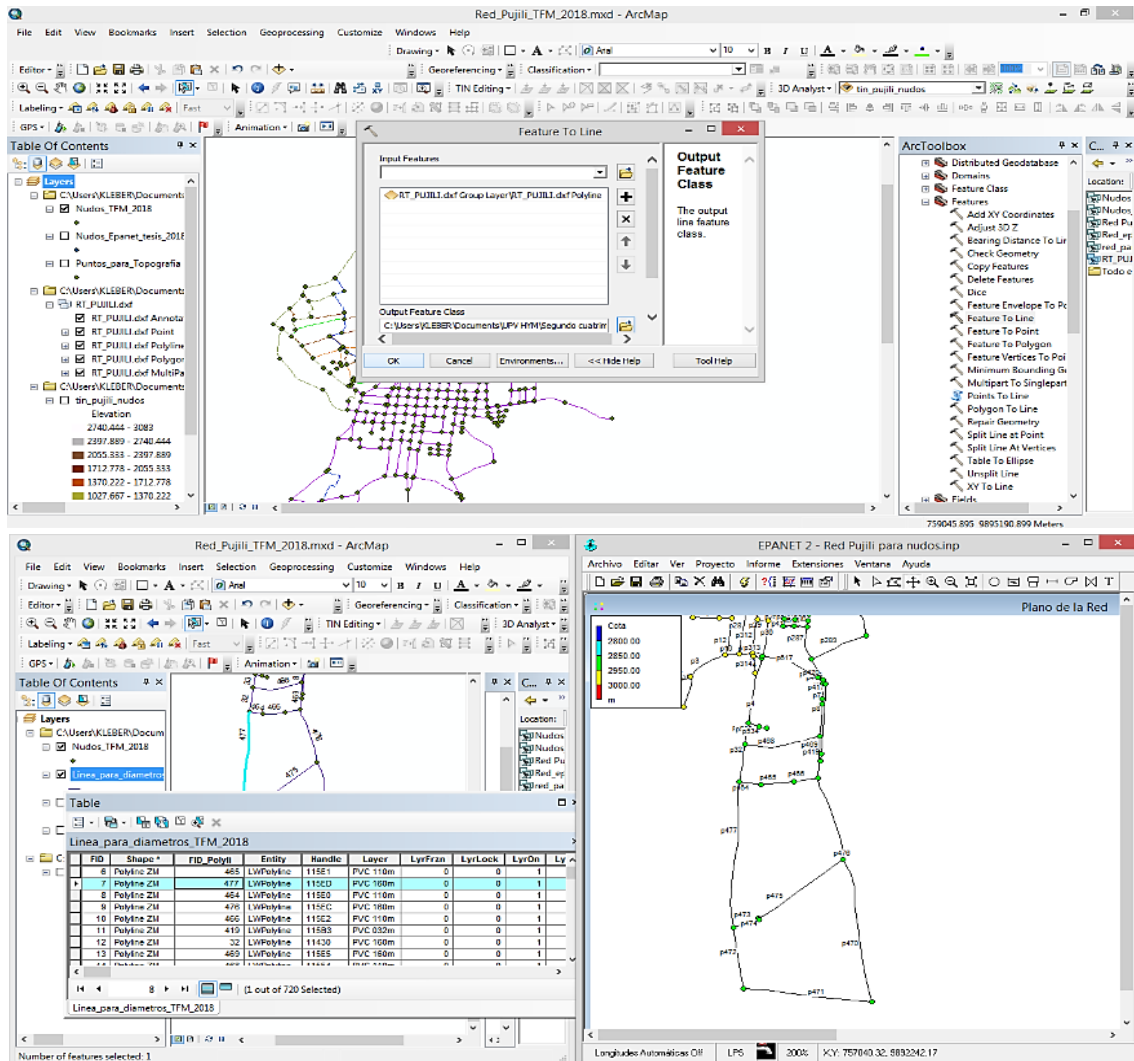


Figura 41 Transformación a .shp, numeración de elementos en ArcMap y Epanet.

Posteriormente se procede a la exportación de la tabla de atributos del nuevo archivo creado en ArcMap a Excel. Esta tabla contiene el nombre de las capas (Diámetro nominal) de cada línea, esto facilita la asignación de los diámetros a las tuberías (Figura 42). Es importante indicar que la identificación de la línea en ArcpMap (que es la misma que en Epanet), figura en la columna **FID\_Polyli** de la tabla de atributos.



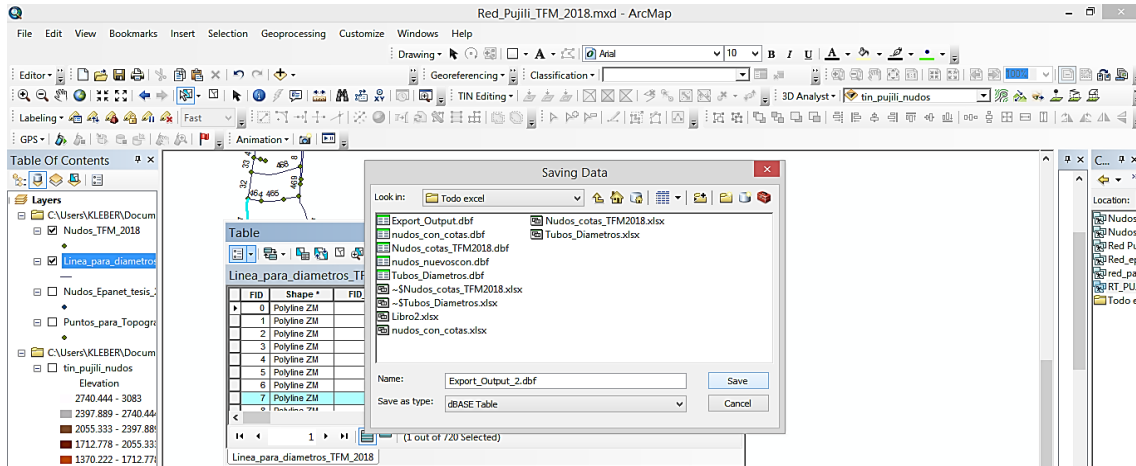


Figura 42 Exportar tabla de atributos de las líneas (tubería existente) al Excel.

Finalmente se procede a la asignación de los diámetros a las tuberías del modelo en Epanet, para esto se utiliza las herramientas del programa Excel así como también la información exportada desde ArcMap y Epanet. Como punto de control es necesario verificar la información asignada a las tuberías, esto se logra comparando la información del programa ArcMap y Epanet (Figura 43).

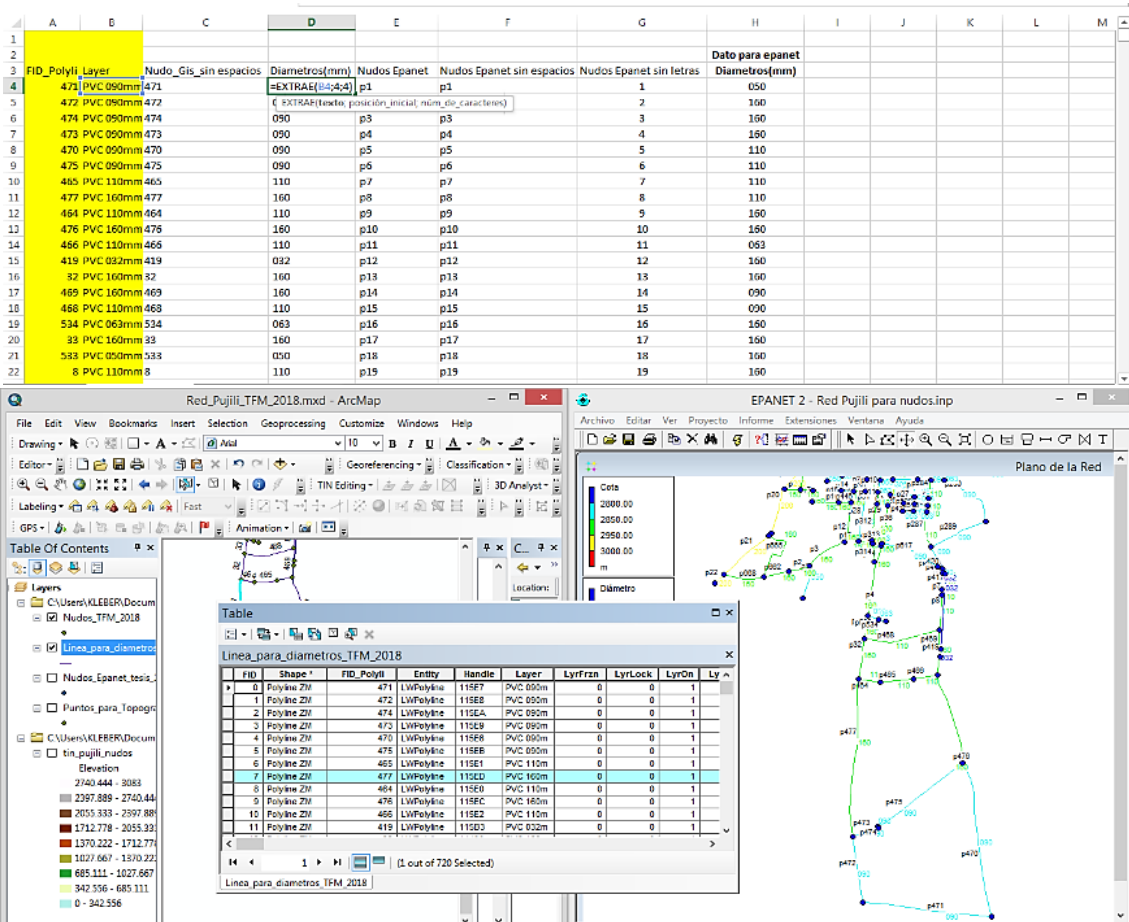


Figura 43 Diámetros de tuberías en Epanet y verificación de numeración de líneas.



### 3.1.2.4 Edición y verificación del modelo de red

La edición de la red en Epanet tiene como principal objetivo verificar las conexiones entre nudos y líneas, corregir posibles errores y asignar los embalses de la red (Figura 44), en este punto es necesario asignar la letra “R” en la etiqueta del embalse seguido del número de nudo. Por otro lado la cota del embalse es la misma del nudo al que reemplaza, también es necesario anotar los nudos eliminados y nudos nuevos para poder trabajar posteriormente en el desarrollo del modelo.

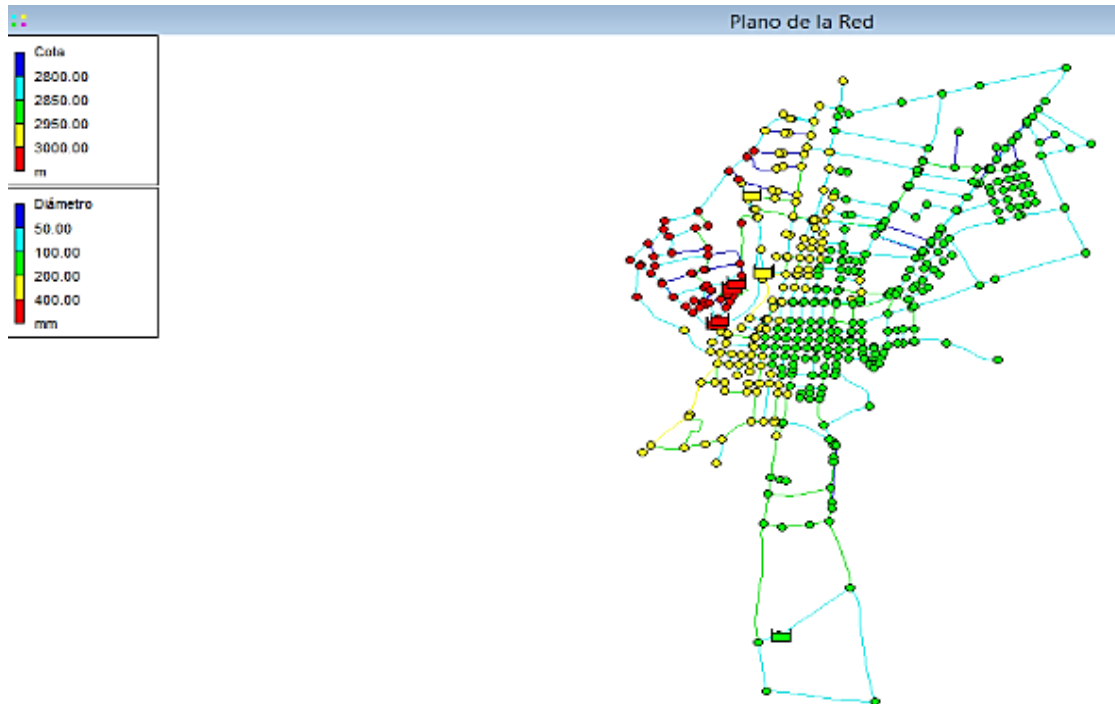


Figura 44 Edición del Modelo en Epanet y asignación de Embalses.

Tabla 6 Nudos eliminados y tuberías, nudos creados.

Resumen de elementos nuevos				
Nudos eliminados	Nudos nuevos	Embalses	Tuberías nuevas	Tuberías eliminadas
n146	Q436	R49	W577	P319
	Q403	R481	W357	
		R48	W432	
		R477	w398	
		R423	W348	
n380		R395		
		R394		
		R367		
		R139		
		R138		

### 3.2 ASIGNACIÓN DE DEMANDAS A NUDOS DE CONSUMO. DENSIDAD POBLACIONAL UNIFORME

A continuación, se presenta un diagrama del procedimiento a seguir para la asignación de demandas a los nudos. Para ello se parte de la información inicial aportada por la empresa EPAPAP, seguido del cálculo de la demanda y densidad poblacional. Posteriormente se traza los polígonos de Thiessen que permite la distribución de la demanda de acuerdo al área de influencia de cada nudo de consumo y finalmente se asigna las demandas a cada nudo para ingresarlos en el modelo de Epanet.

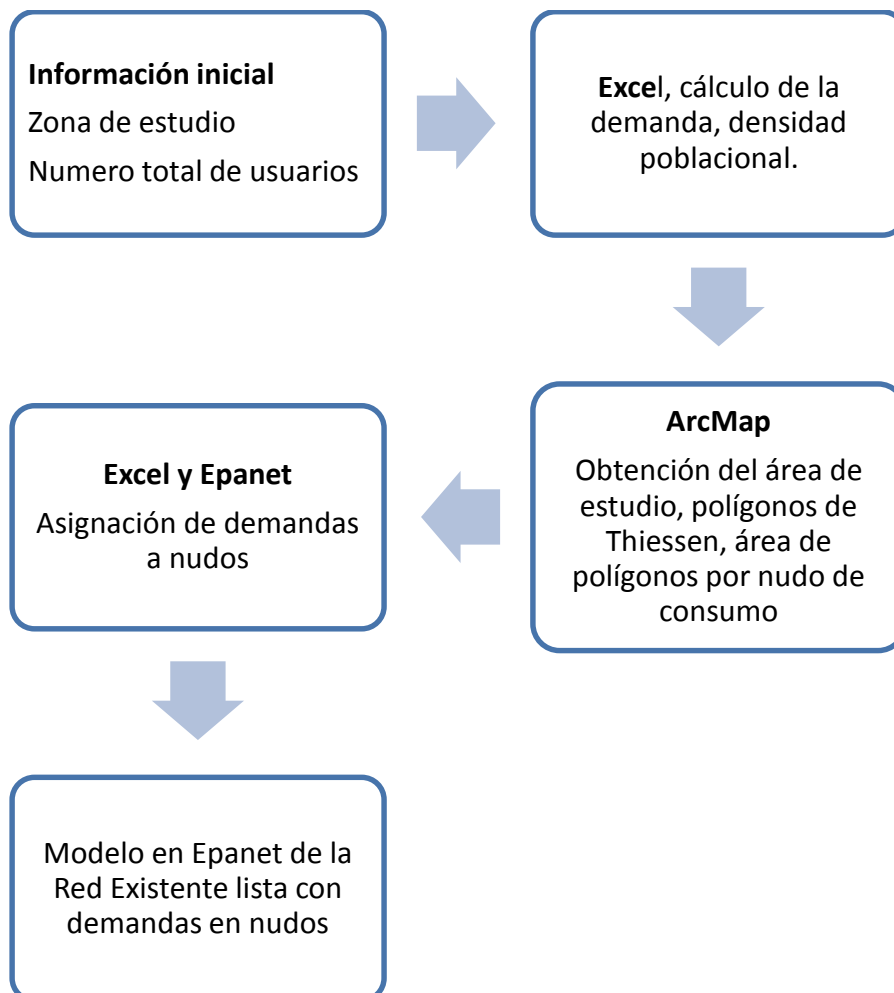


Figura 45 Etapas para la asignación de demandas a los nudos del Modelo.

### 3.2.1 INFORMACIÓN INICIAL

La empresa EPAPAP en principio, facilita el número de usuarios que abastece el sistema de agua potable de la ciudad de Pujili, por lo que es necesario realizar una estimación de la dotación actual. Con el objeto de disponer de información para el cálculo aproximado de la dotación se consulta la siguiente información:

- Número total de usuarios (Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de Pujilí).
- Promedio de personas por hogar (Instituto Nacional de Estadísticas y Censo).
- Dotación Media (Secretaría del Agua Ecuador)

Según los datos aportados, la población abastecida es próxima a 21,057 habitantes tal como se indica en la Tabla 7.

Tabla 7 Información de usuarios conectados a la red EPAPAP

Número de usuarios (EPAPAP)	Promedio de personas por hogar (INEC)	Total de Habitantes con servicio
5,331	3.95	21,057

Respecto a la dotación, el valor asumido para el cálculo aproximado de la demanda es de 200 (l/hab/día), correspondiente a un clima templado y a una población comprendida entre 5000 a 50000 habitantes (Tabla 8).

Tabla 8 Dotación sugerida (Secretaría del Agua, 2015).

POBLACIÓN (habitantes)	DOTACIÓN MEDIA FUTURA	
	CLIMA	(l/hab/día)
Hasta 5000	Frío	120 – 150
	Templado	130 – 160
	Cálido	170 – 200
5000 a 50000	Frío	180 – 200
	Templado	190 – 220
	Cálido	200 – 230
Más de 50000	Frío	> 200
	Templado	> 220
	Cálido	> 230

### 3.2.2 DETERMINACIÓN DEL CONSUMO MEDIO DIARIO APROXIMADO

Para el cálculo del caudal medio consumido por la población, se utilizó la ecuación (3), en donde tenemos como datos de entrada la dotación y el número total de habitantes que poseen el servicio de agua potable. Una vez realizado el cálculo se obtuvo un caudal demandado de 48.74 l/s.

$$Q_{\text{demandado}} = \text{Dotación} \times \text{Habitantes} \quad (3)$$

Tabla 9 Cálculo de Q demandado aproximado.

Caudal demandado		
Dotación=	200	l/habitante/día
Total de habitantes con servicio=	21,057	habitantes
Consumo ( $Q_{\text{demandado}}$ )=	48.74	l/s

### 3.2.3 ASIGNACIÓN DE LAS DEMANDAS A NUDOS DE CONSUMO

Por la falta de información de los consumos por cada usuario y al no contar con datos de contadores georreferenciados se hace un trabajo laborioso la distribución de la demanda a cada nudo, debido a esta situación se procede a utilizar los polígonos de Thiessen.

Los polígonos de Thiessen se utilizan para determinar un valor medio en una zona, mediante una media ponderada de valores procedentes de varios nudos, cada nudo se rodea de un polígono y se supone que todo el polígono recibe una misma dotación que el nudo central.

Para dibujar los polígonos se trazan las mediatrices de las líneas que unen los diversos nudos de consumo. Se debe recordar que una mediatriz es la línea recta perpendicular a un segmento de recta y que parte de un punto medio, se prolonga las mediatrices hasta el límite del área de estudio y finalmente se delimita el área formado por las mediatrices para cada nudo de consumo.

Considerando una densidad poblacional uniforme se distribuirá a cada nudo por porcentaje del área del proyecto a la que suministra el agua, para este propósito se utiliza los polígonos de Thiessen.

$$Q_{demandado} = \frac{\sum_i^{i+1} A_i * Q_{demandado}}{A_{total}} \quad (4)$$

$$Q_{nudo} = \frac{A_i * Q_{demandado}}{A_{total}} \quad (5)$$

Donde

$A_i$ = Área de aporte a cada nudo de consumo.

$A_{total}$ = Área total de proyecto.

$Q_{nudo}$ = caudal medio demandado en cada nudo.

### 3.2.3.1 Procedimiento para la asignación de las demandas a nudos de consumo

Para éste propósito se inicia exportando el plano del modelo de Epanet que fue modificado anteriormente, en el cual contiene los embalses y nudos nuevos, esto se realiza con ayuda de la herramienta exportar plano a un formato .dxf (Figura 46).

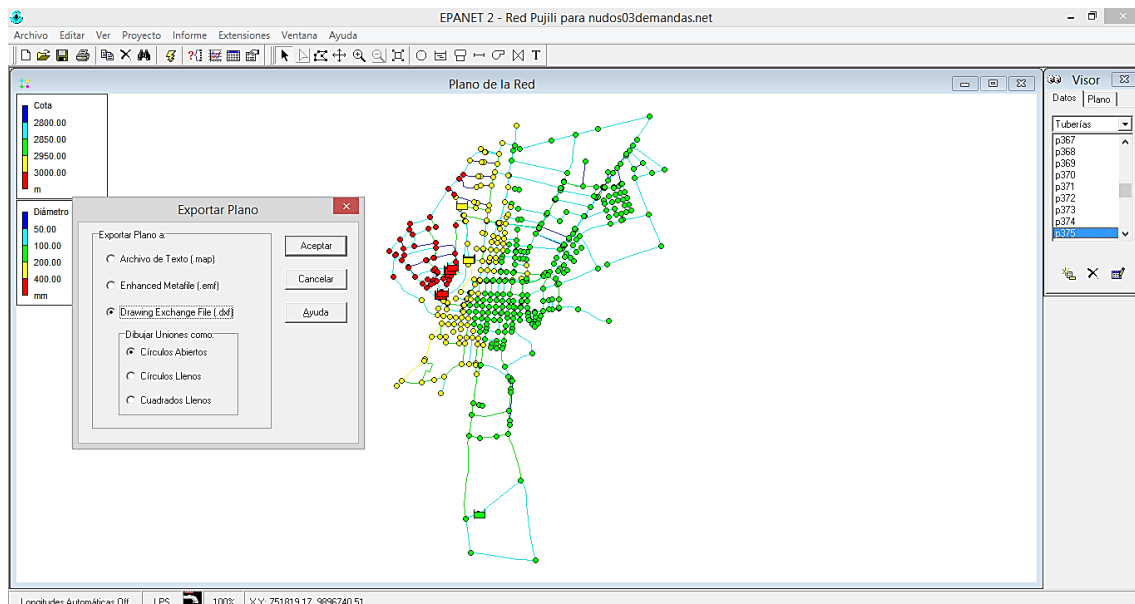


Figura 46 Exportar Modelo corregido y con embalses a formato .dxf.

Posteriormente se seleccionan los nudos de consumo, copiando sus coordenadas de origen en una nueva hoja de trabajo en Autocad. Esto es necesario realizarlo ya que se



trabaja con los polígonos de Thiessen (Figura 47). Una vez generado este nuevo archivo se guarda en formato .dxf para poder trabajar en ArcMap.

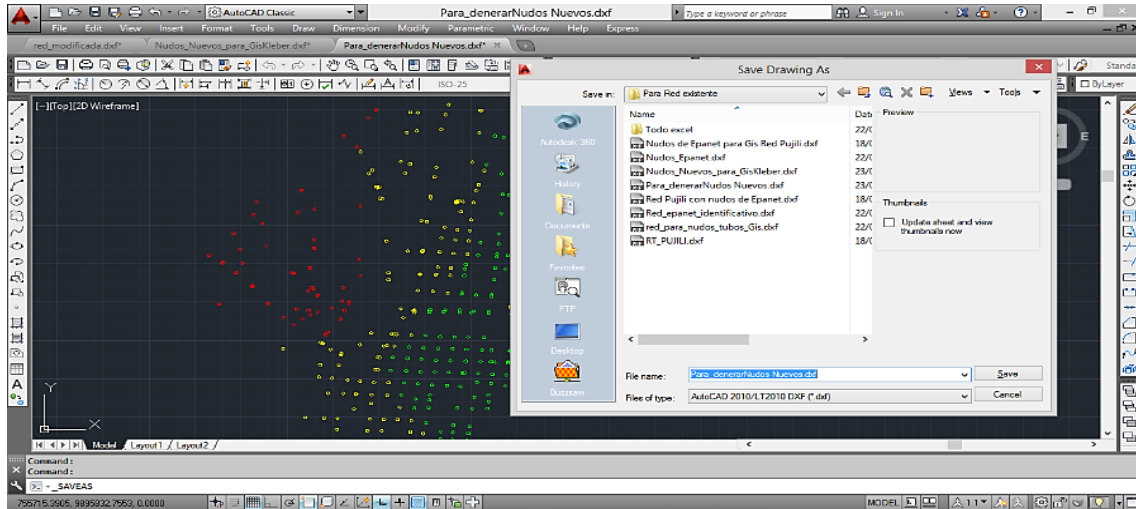


Figura 47 Selección de nudos de consumo, con coordenadas en formato .dxf.

A continuación, con ayuda de ArcMap, se trabaja con el archivo que contiene los nudos de consumo, asignándole el sistema de proyección geográfica correspondiente al proyecto (WGS 1984 UTM Zona 17 S).

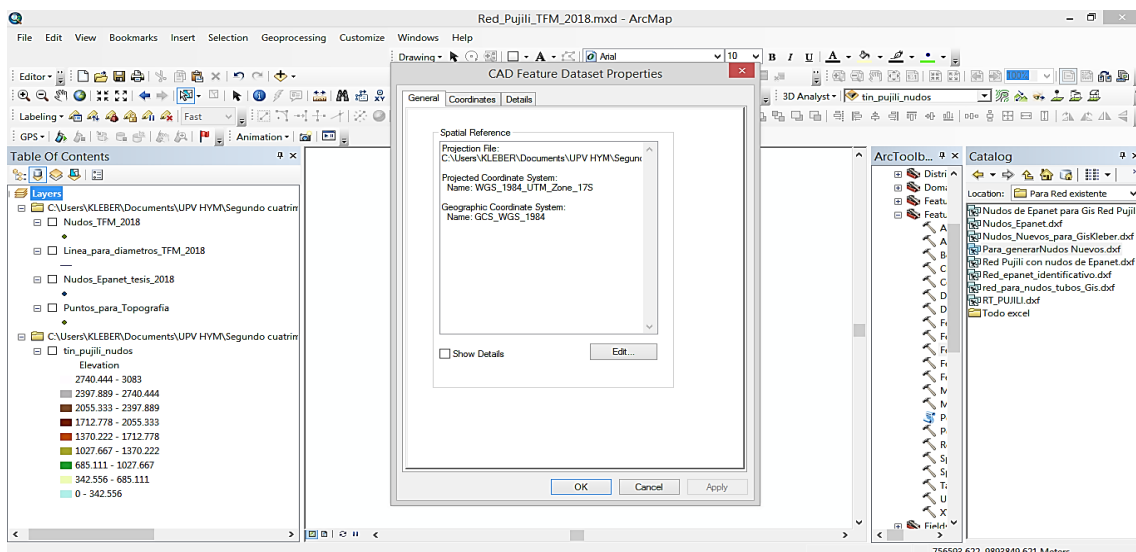


Figura 48 Asignar sistema de proyección geográfica a nudos de consumo.

Posteriormente se debe transformar el archivo .dxf a un formato .shp, para ello se utiliza las herramientas del programa ArcMap.

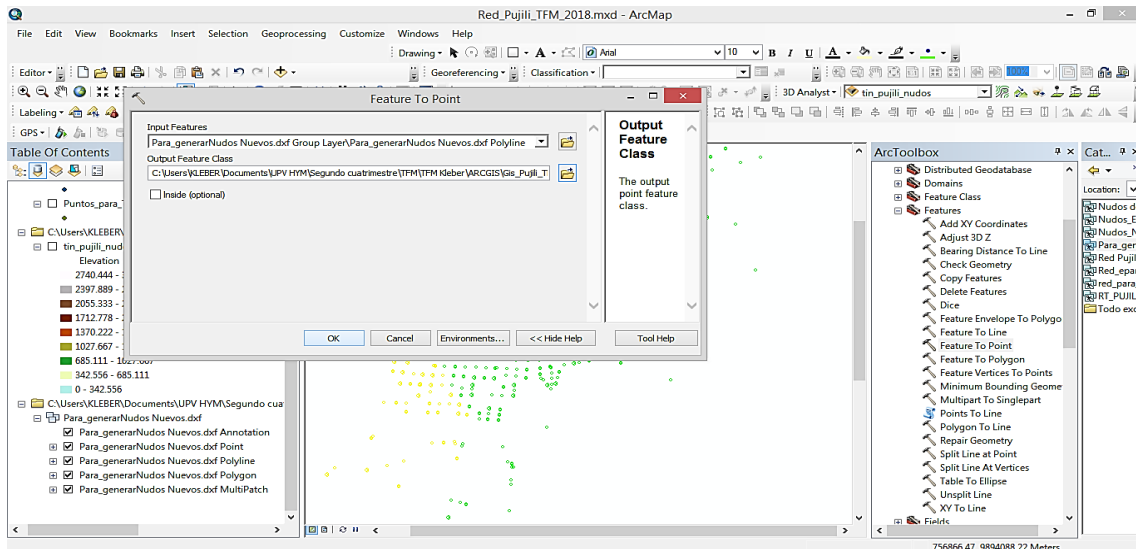


Figura 49 Transformación a formato .shp nudos de consumo en ArcMap.

Realizado lo anterior, con la ayuda de las herramientas del programa ArcMap, se trazan los polígonos de Thiessen. Es importante tener en cuenta que los nudos utilizados para el trazado deben ser solo los de consumo (Figura 50).

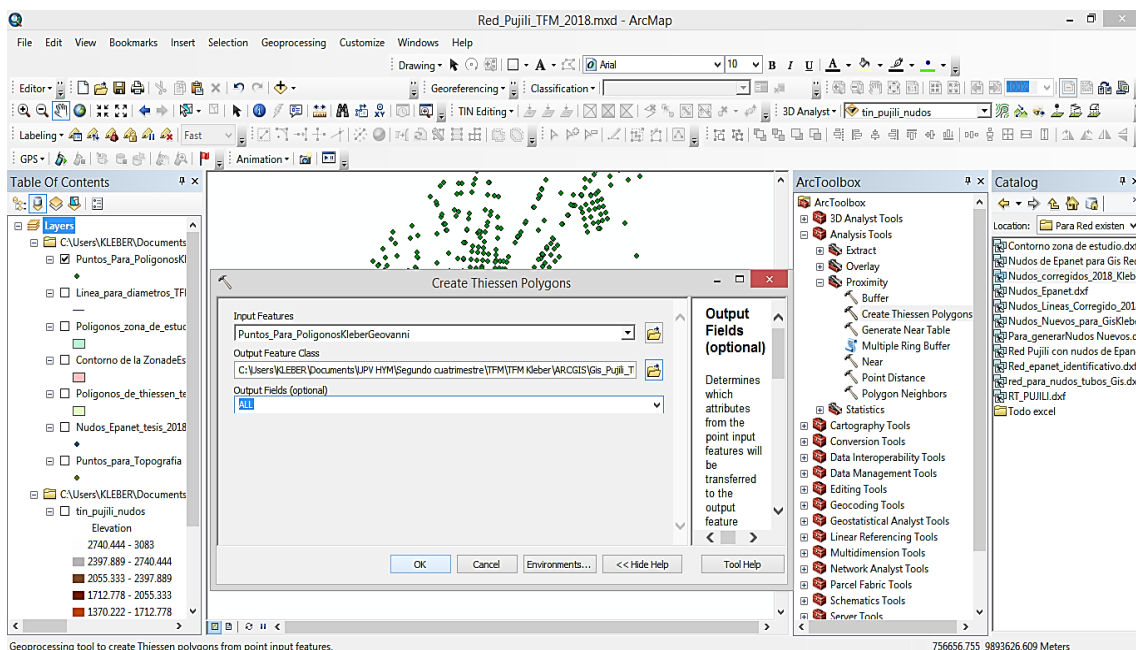


Figura 50 Trazado de polígonos de Thiessen en ArcMap.

Una vez finalizado el proceso de la generación de los polígonos se tiene áreas que están fuera del perímetro del proyecto, por otra parte también se observa que en la tabla de atributos del nuevo archivo existe la identificación de cada nudo ver Figura 51

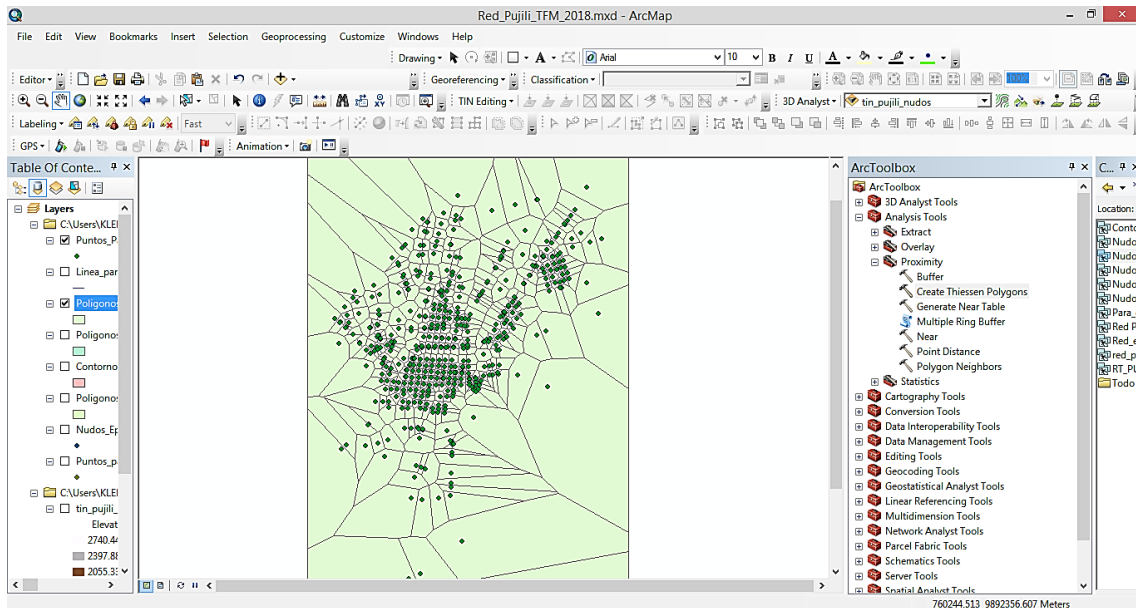


Figura 51 Polígonos trazados.

A continuación, se procede a delimitar el área del proyecto, con el fin de recortar los polígonos creados anteriormente, para este propósito se utiliza el programa AutoCAD generando un polígono que cubra el total del área de estudio y posteriormente se guarda el polígono de contorno en formato .dxf. En el programa ArcMap se asigna el sistema de proyección geográfica al archivo del polígono que delimita el área de estudio, para esto se utilizó las herramientas del programa (Figura 52). Una vez en el programa se transformó el archivo .dxf a formato .shp para poder trabajar posteriormente.

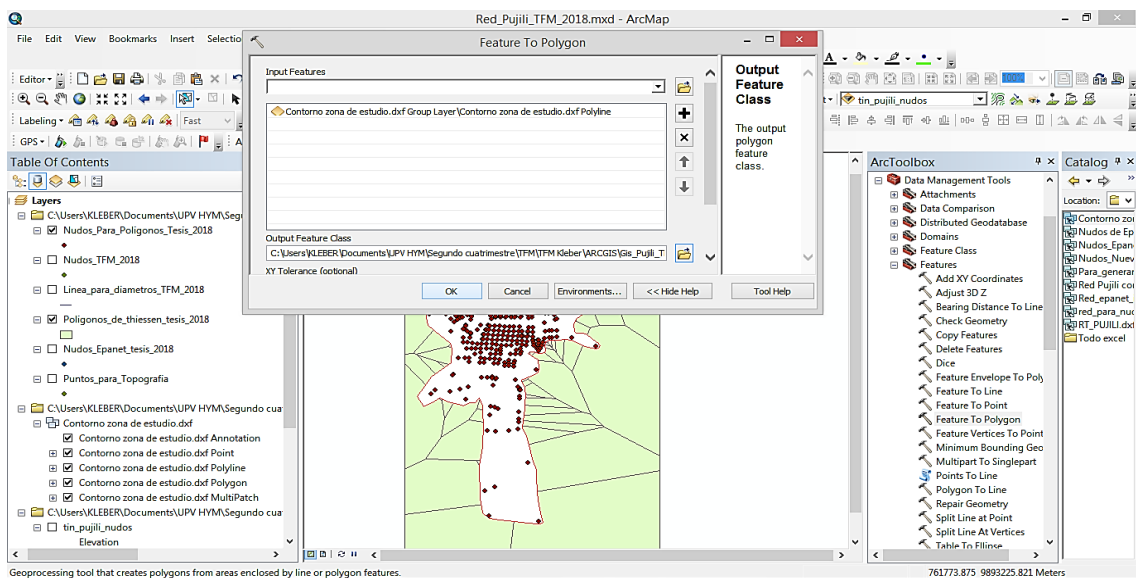


Figura 52 Asignación de sistema de proyección geográfica y transformación .shp.

Después se procede a recortar los polígonos de Thiessen, esto se logra con ayuda de las 2 capas creadas anteriormente, una contiene la delimitación del proyecto y otra las áreas de influencia de cada nudo de consumo (Figura 53).

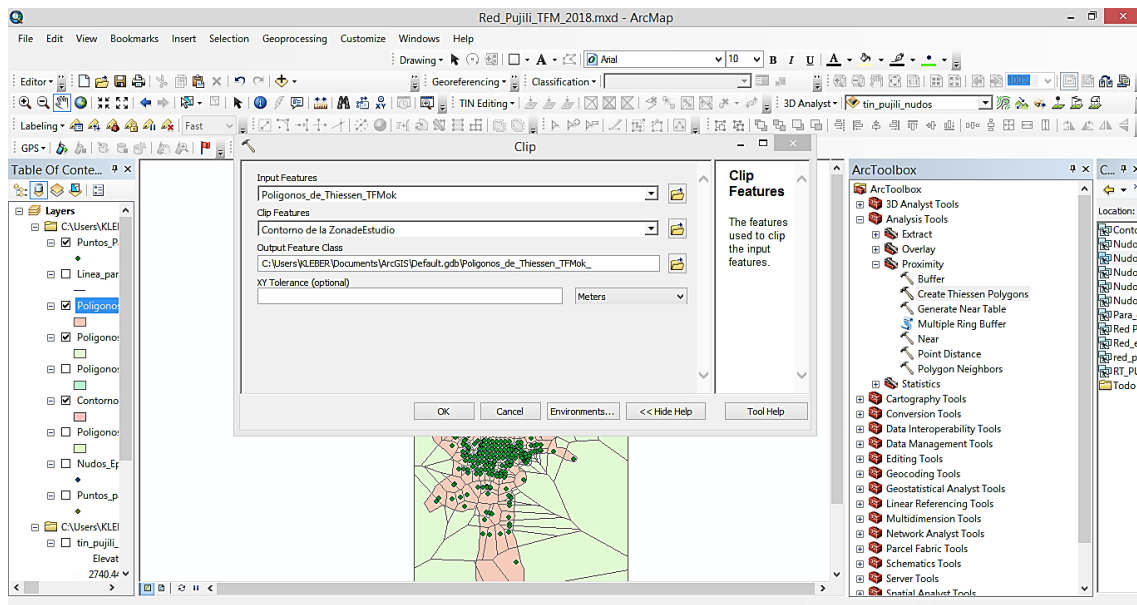


Figura 53 Recortar Polígonos con el contorno del área de cobertura de la red.

Una vez que se ha recortado los polígonos con ayuda de las herramientas de ArcMap, se puede visualizar una representación exacta al área del proyecto (ver Figura 54).

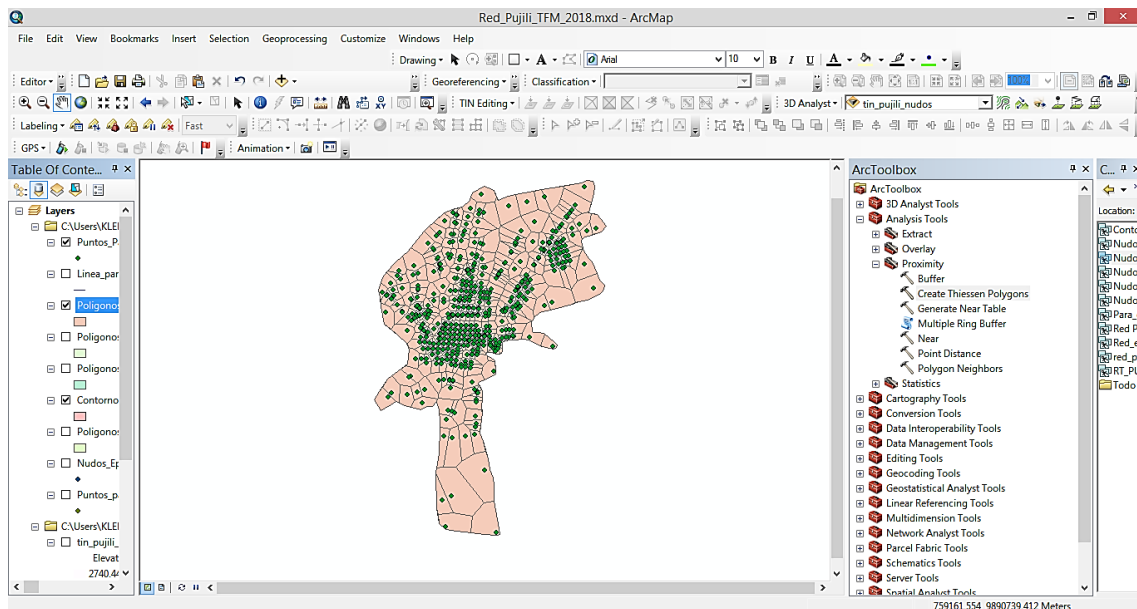


Figura 54 Polígonos recortados.

Luego se hace el cálculo de las demandas de los nudos de consumo con el programa ArcMap, para esto se trabaja con la tabla de atributos de los polígonos recortados. En tabla de atributos se implementa cuatro nuevas columnas, las cuales contendrán la siguiente información.



- Demanda media total (l/s)
- Área de cada polígono de thieesen (m<sup>2</sup>)
- Área total de la zona de trabajo (m<sup>2</sup>)
- Caudal por nudo en l/s.

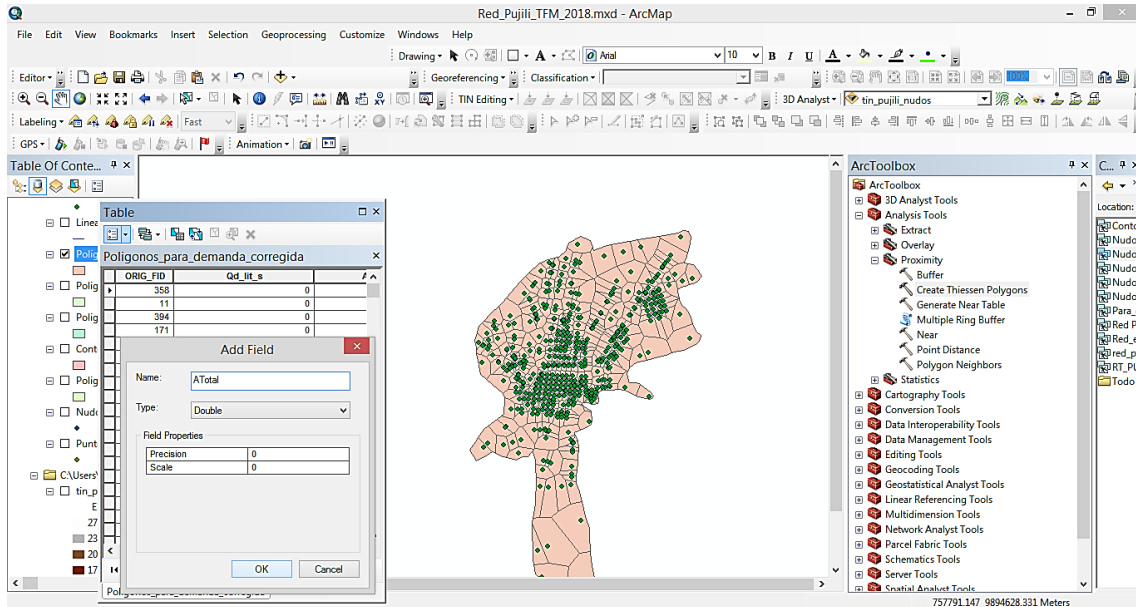


Figura 55 Creación de nuevas columnas en la tabla de atributos de polígonos.

A continuación se precede a llenar la información de cada una de las columnas, en la columna que contiene la demanda media total se coloca el valor respectivo que es 48.74 l/s como se observa a continuación.

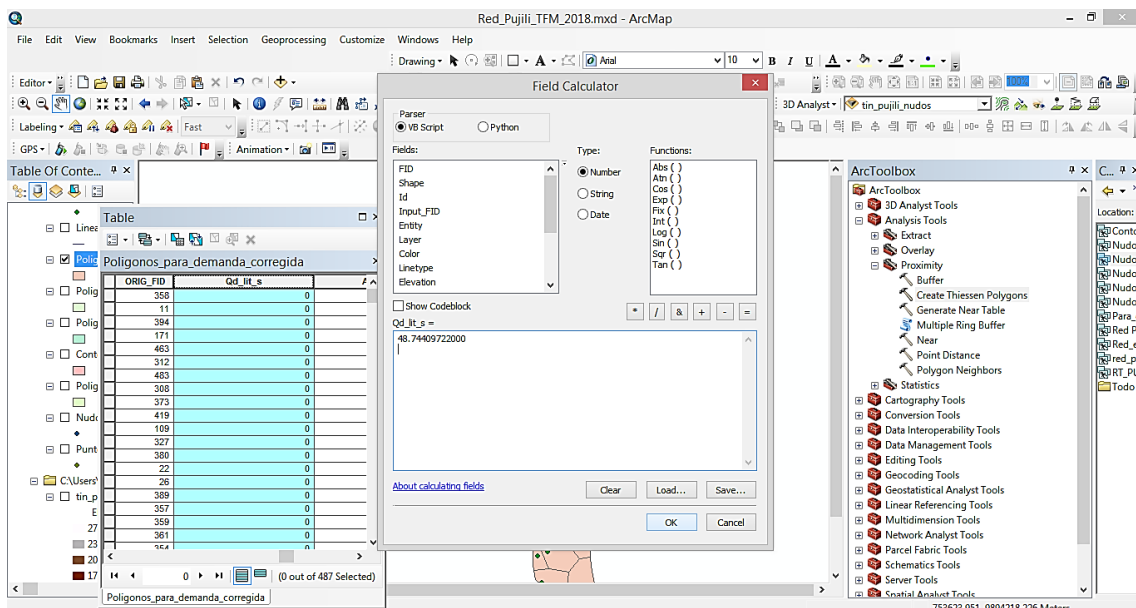


Figura 56 Ingreso de demanda media total.





Ya que se tiene el área total de los polígonos, lo que sigue es asignar a la columna correspondiente (Figura 59).

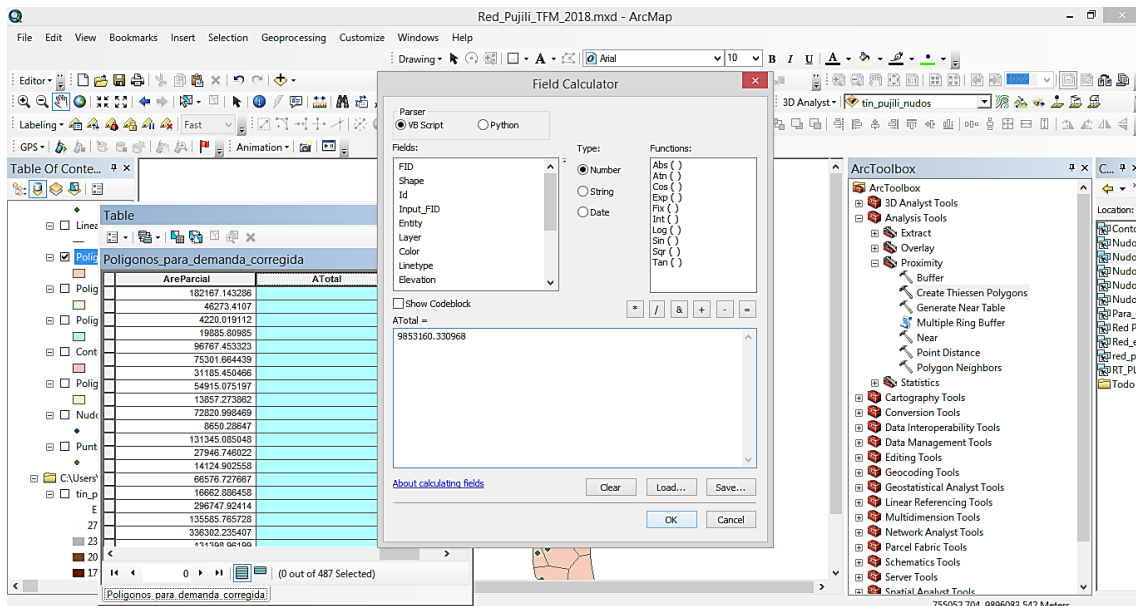


Figura 59 Asignar el valor del área total de los polígonos.

A continuación, con ayuda de la calculadora del programa ArcMap, se procede a colocar los datos de acuerdo a la ecuación (5). Como se observa en la Figura 60, cuyo resultado se inserta en la columna correspondiente a demandas de nudos.

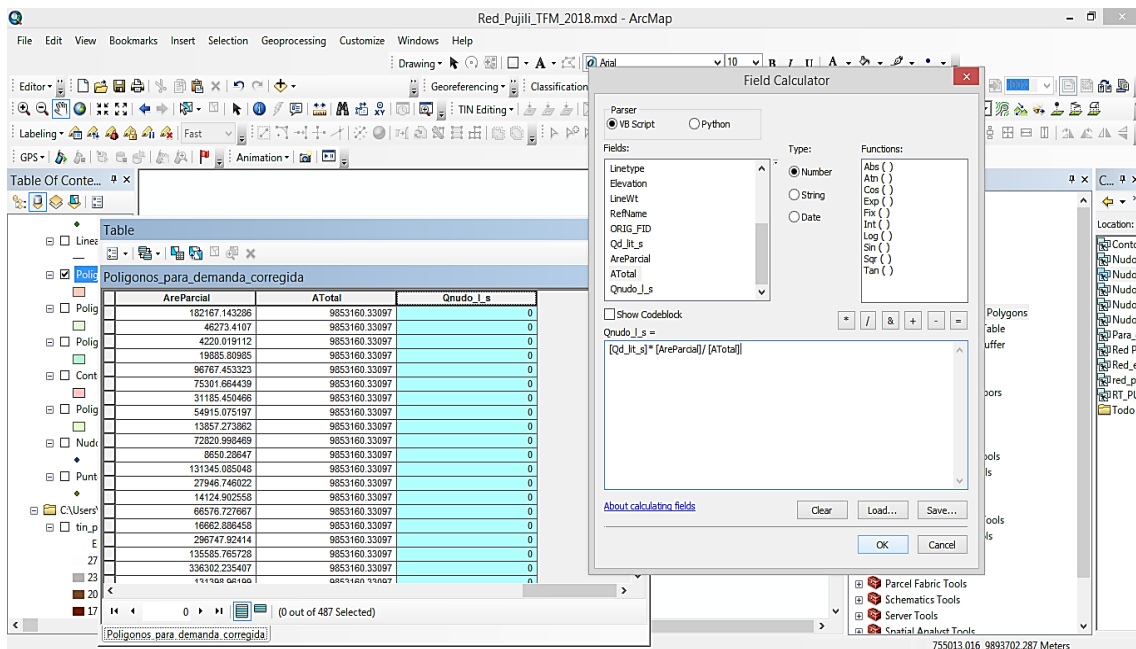


Figura 60 Cálculo de la demanda de nudos.

Una vez finalizado el cálculo de la demanda de cada nudo de consumo es necesaria verificar que la suma total sea igual a la demanda media total cuyo valor es 48.74 l/s (ver Figura 61).

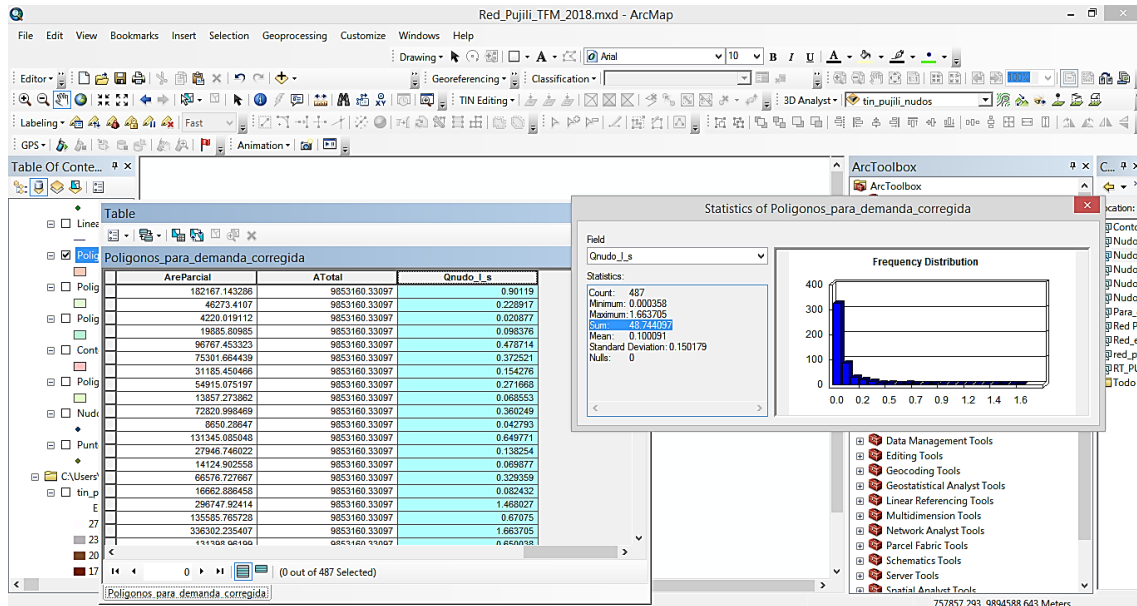


Figura 61 Valores calculados de demanda a cada nudo y revisión de sumatoria.

Finalmente, se asignan las demandas a los nudos del modelo de Epanet, para lo cual se precede de la siguiente manera:

1. Identificación en la tabla de atributos la columna que contiene los nombres de los nudos de Epanet, cabe recalcar que en la columna **ORIG\_FID** se ubica la identificación de los nudos como se visualiza a continuación.

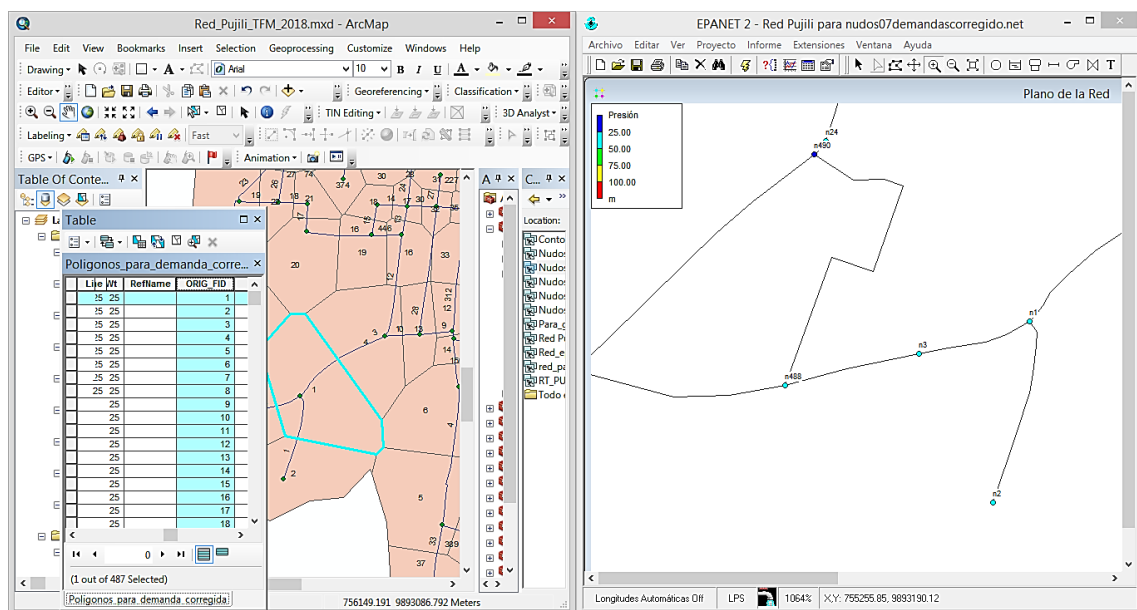


Figura 62 Revisión de nudos en ArcMap y Epanet.

En la fase de asignación de embalses al Modelo fueron eliminados algunos nudos ver Tabla 10, por lo que es necesario tener en cuenta al momento de relacionar Epanet y ArcMap, es preciso aclarar que tanto en Epanet como en ArcMap la numeración de los nudos los realizan de acuerdo al orden de creación, por lo que es posible relacionar el mismo número de nudos y en el mismo orden de creación.

Tabla 10 Nudos eliminados

Nudos eliminados	Nudos eliminados
R48	n380
R49	R367
R138	R394
R139	R395
n146	R423
	R477
	R481

Por lo antes expuesto es necesario revisar aleatoriamente la nomenclatura de los nudos en ArcMap y Epanet, proceso que ayuda a controlar la pertenencia de la misma identificación y orden en los 2 programas, esto permite trabajar posteriormente.

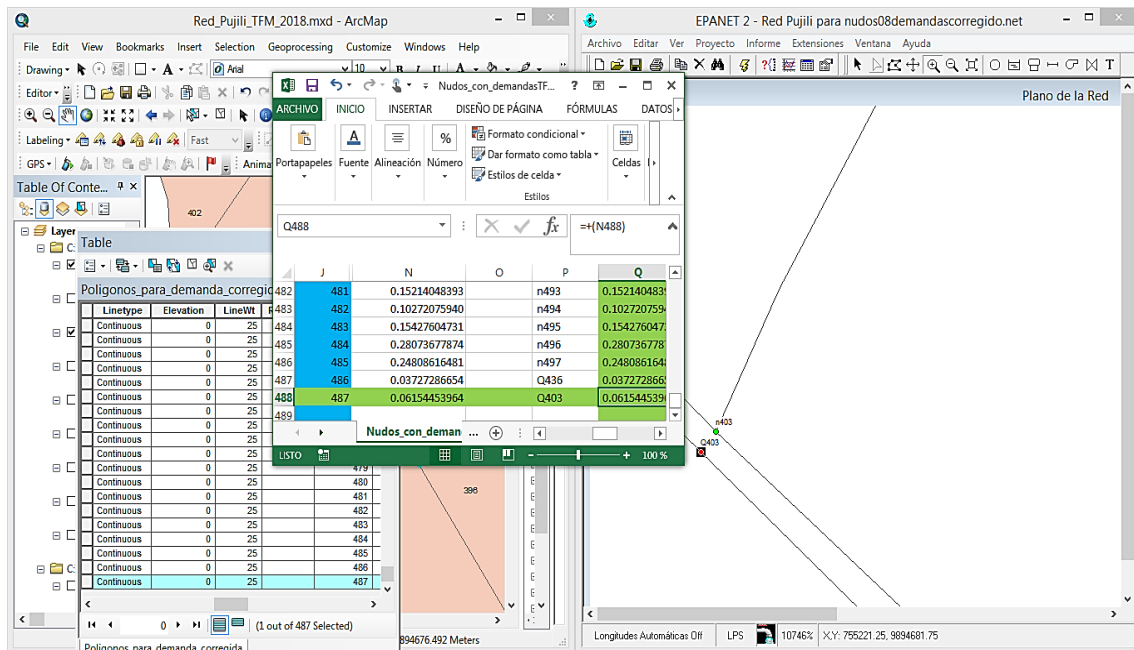


Figura 63 Verificación de la numeración de los nudos de consumo.

- Exportación de la tabla de atributos de ArcMap que contiene los nombres de los nudos y la demanda de cada uno de ellos al Excel (ver Figura 64).

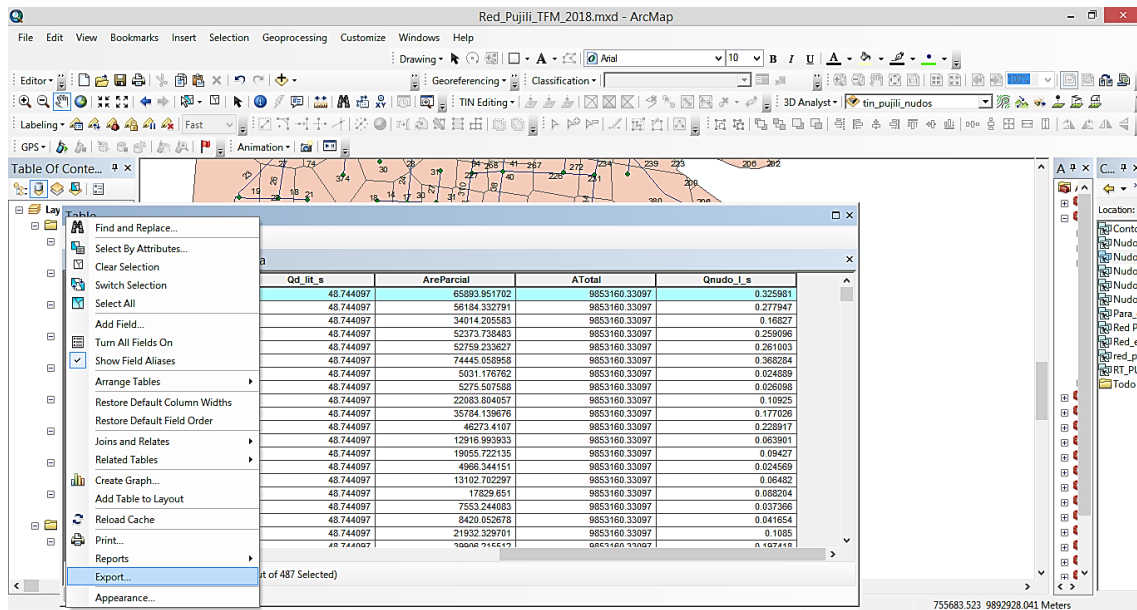


Figura 64 Exportar tabla de atributos de nudos con demandas.

- Exportación de la información de la red de Epanet a Excel. Esto se realiza mediante la herramienta extensiones que permite visualizar en bloc de notas de ahí se lo lleva al Excel (Figura 65).

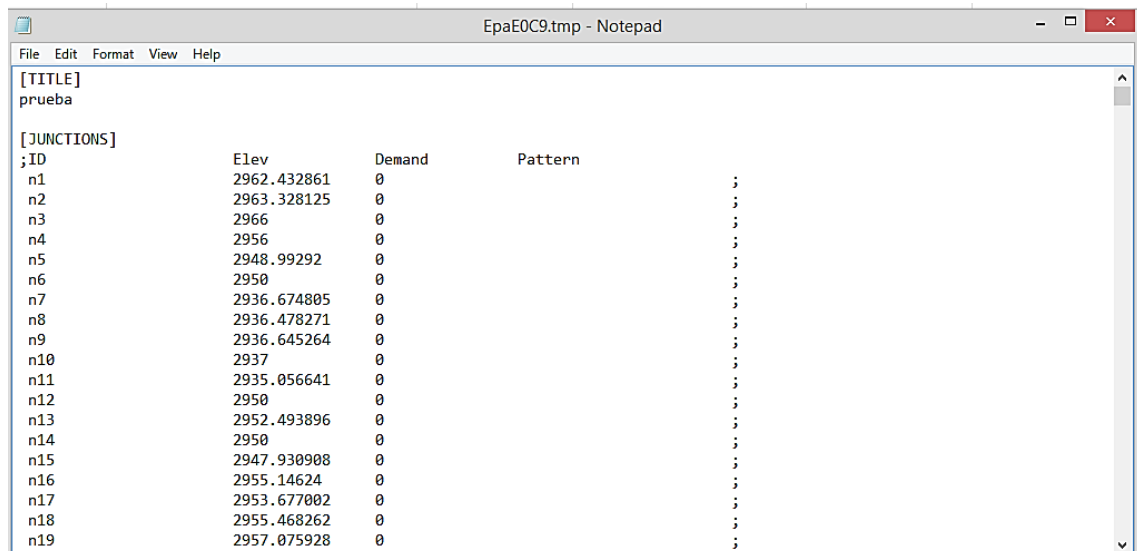


Figura 65 Información del Epanet exportar a Excel.



4. Una vez que se tiene la información tanto de ArcMap como de Epanet se edita y asignan las demandas correspondientes a cada nudo, y se introduce esta información al modelo de Epanet (Figura 66).

ID	Input	Entity	Layer	LineType	Elevation	RefName	ORIG_ID	Onudo_Is	Nudos Epa	Qnudos (/s)
1	0	Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	1	0.32598081023	n1	0.325980810
2	0	1 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	2	0.27794681988	n2	0.277946820
3	0	2 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	3	0.16827094617	n3	0.168270946
4	0	3 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	4	0.25999551442	n4	0.259995511
5	0	4 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	5	0.26100267597	n5	0.261002676
6	0	5 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	6	0.36828358308	n6	0.368283583
7	0	6 Circle	JUNCTIONS	3 Continuo	0.0000000000	25	7	0.02488949342	n7	0.024889493
8	0	7 Circle	JUNCTIONS	3 Continuo	0.0000000000	25	8	0.02609821074	n8	0.026098211
9	0	8 Circle	JUNCTIONS	3 Continuo	0.0000000000	25	9	0.10924972859	n9	0.109249729
10	0	9 Circle	JUNCTIONS	3 Continuo	0.0000000000	25	10	0.17702650239	n10	0.177026502
11	0	10 Circle	JUNCTIONS	3 Continuo	0.0000000000	25	11	0.22891697233	n11	0.228916972
12	0	11 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	12	0.06390104158	n12	0.063901042
13	0	12 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	13	0.09426965025	n13	0.094269650
14	0	13 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	14	0.02456876512	n14	0.024568765
15	0	14 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	15	0.06481975053	n15	0.064819751
16	0	15 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	16	0.08820421190	n16	0.088204212
17	0	16 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	17	0.03736629178	n17	0.037366292
18	0	17 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	18	0.04165443904	n18	0.041654439
19	0	18 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	19	0.10850037707	n19	0.108500377
20	0	19 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	20	0.19741812609	n20	0.197418126
21	0	20 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	21	0.05117263171	n21	0.051172632
22	0	21 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	22	0.06987662845	n22	0.069876628
23	0	22 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	23	0.23643256909	n23	0.236432569
24	0	23 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	24	0.24582281378	n24	0.245822814
25	0	24 Circle	JUNCTIONS	5 Continuo	0.0000000000	25	25	0.34280297975	n25	0.342802980
26	0	25 Circle	JUNCTIONS	5 Continuo	0.0000000000	25	26	0.32935853848	n26	0.329358538
27	0	26 Circle	JUNCTIONS	4 Continuo	0.0000000000	25	27	0.09002410643	n27	0.090024106

Figura 66 Trabajos en Excel asignación de demandas a nudos Epanet.

5. Se verifica aleatoriamente la información asignada a cada nudo con el fin de identificar cualquier error al momento de relacionar los nudos, para esto se utiliza los programas ArcMap y Epanet, (Figura 67).

RefName	ORIG_FID	Qd_It	AreaParcial	ATotal	Qnudo_Is
469	48.744097	13308.190411	9853160.33	0.085641	
470	48.744097	3495.889944	9853160.33	0.017293	
471	48.744097	3191.908163	9853160.33	0.015791	
472	48.744097	21091.744767	9853160.33	0.104342	
473	48.744097	45078.624398	9853160.33	0.223006	
474	48.744097	38092.444177	9853160.33	0.188445	
475	48.744097	152994.364575	9853160.33	0.756571	
476	48.744097	62923.047654	9853160.33	0.311284	
477	48.744097	5478.03504	9853160.33	0.0271	
478	48.744097	56190.073101	9853160.33	0.277975	
479	48.744097	13273.038953	9853160.33	0.065682	
480	48.744097	98094.139293	9853160.33	0.490224	
481	48.744097	38753.768434	9853160.33	0.152114	
482	48.744097	20764.034404	9853160.33	0.102721	
483	48.744097	31185.450468	9853160.33	0.154276	
484	48.744097	56748.296708	9853160.33	0.280737	
485	48.744097	50148.282503	9853160.33	0.248098	
486	48.744097	7534.359491	9853160.33	0.037273	
487	48.744097	12440.64925	9853160.33	0.081545	

Figura 67 Verificación de las demandas ingresadas a nudos en Epanet.

Finalmente, el modelo de Epanet está completamente editado con demandas, cotas, diámetros en las tuberías, y datos de los embalses.

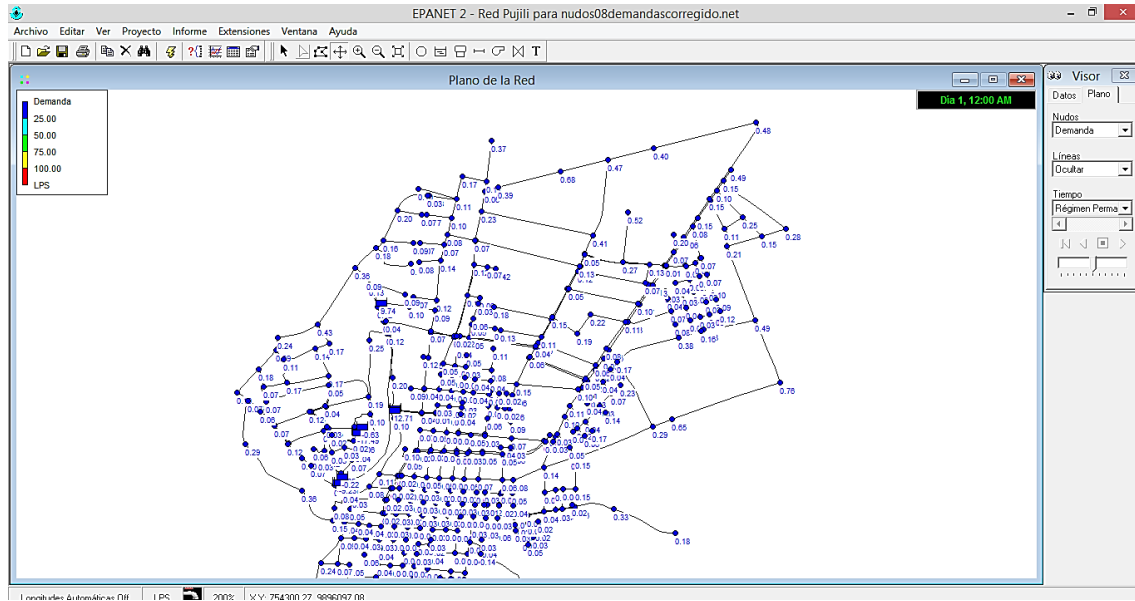


Figura 68 Modelo de Epanet con demandas en cada nudo.

### 3.2.3.2 Simulación del modelo en Epanet con demandas, cotas y diámetros

El objetivo principal de la primera simulación del modelo en Epanet es verificar posibles errores, tanto de conexiones de tuberías, cotas en los nudos y demanda. Tras una simulación sin errores, se comprueba que el modelo elaborado es robusto tras la edición de las diferentes propiedades de los elementos.

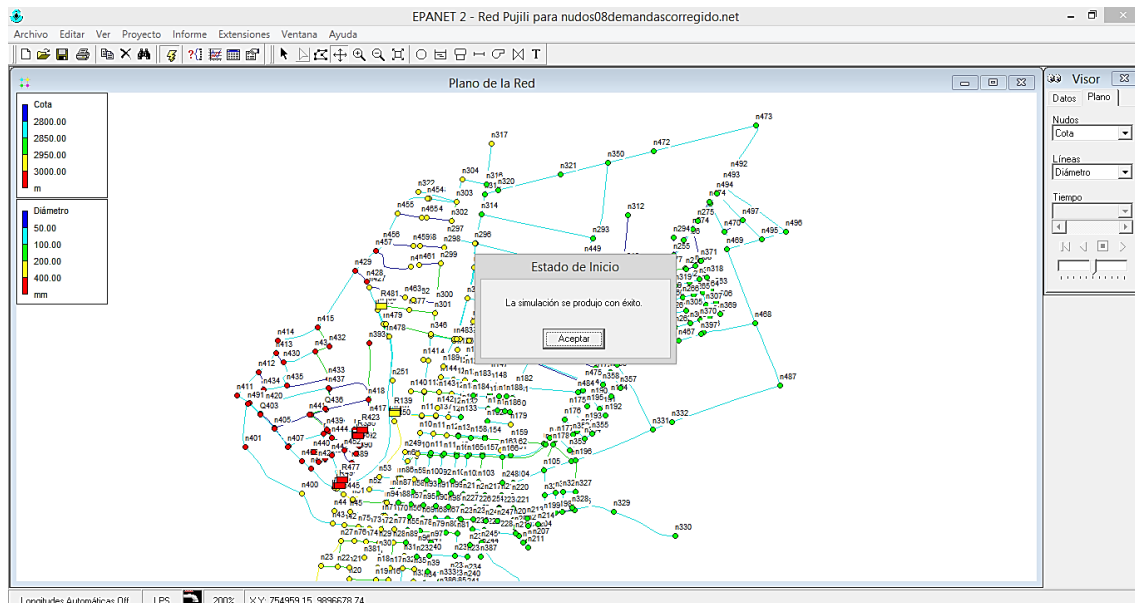


Figura 69 Modelo en Epanet con la primera simulación sin errores.

Conviene subrayar que los diámetros que fueron asignados anteriormente a las tuberías, corresponde a la información entregada por parte de la empresa EPAPAP, una vez revisado los catálogos de proveedores de tuberías en Ecuador, se identificó que el diámetro nominal corresponde a diámetros externos, razón por la cual se asignó al modelo los diámetros internos, para esto se utiliza la siguiente información.

Tabla 11 Diámetros Interiores

Diámetros Tubería PVC	
DN (mm)	D interior (mm)
32	29
50	46
63	57
75	67.8
90	81.4
110	99.4

Diámetros Tubería PVC	
DN (mm)	D interior (mm)
160	144.6
200	180.8
250	226.8
315	285
355	321.2
400	361.8
500	452.2
630	570

Con el objeto de asignar los diámetros internos al modelo se lleva la información de la red a Excel, posteriormente se asigna a cada tubería el diámetro que corresponde, a partir de la relación entre el DN con el diámetro interior comercial de la tubería (Figura 70).

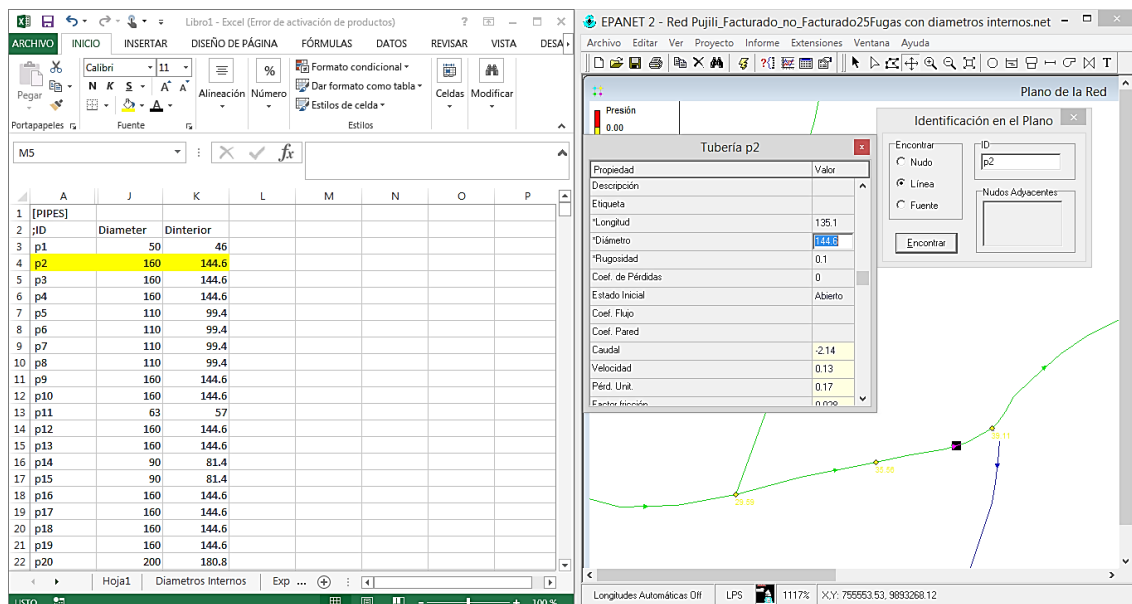


Figura 70 Asignación de diámetros internos.

### 3.2.3.3 Zonificación de la red de acuerdo a los puntos de alimentación

Actualmente la red está interconectada. Para mejorar su gestión se realiza una sectorización atendiendo a los embalses de alimentación correspondiente a cada zona. Para realizar esta sectorización se realizan cierres parciales de tuberías en las cuales se encuentra las válvulas de seccionamiento de acuerdo a la información aportada por la empresa. Como resultado establecen 8 zonas independientes (Tabla 12).

Tabla 12 Zonificación de red existente

Zonificación por embalse de alimentación	
Embalse	Zona
R481	1
R138	2
R139	2
R394	3
R48	4

Zonificación por embalse de alimentación	
R49	4
R395	5
R423	6
R477	7
R367	8

A fin de identificar estas zonas se procede a insertar una etiqueta en Epanet, la cual ayuda a visualizar al momento de cerrar las tuberías y ofrece mejor control en la simulación del modelo (Figura 71).

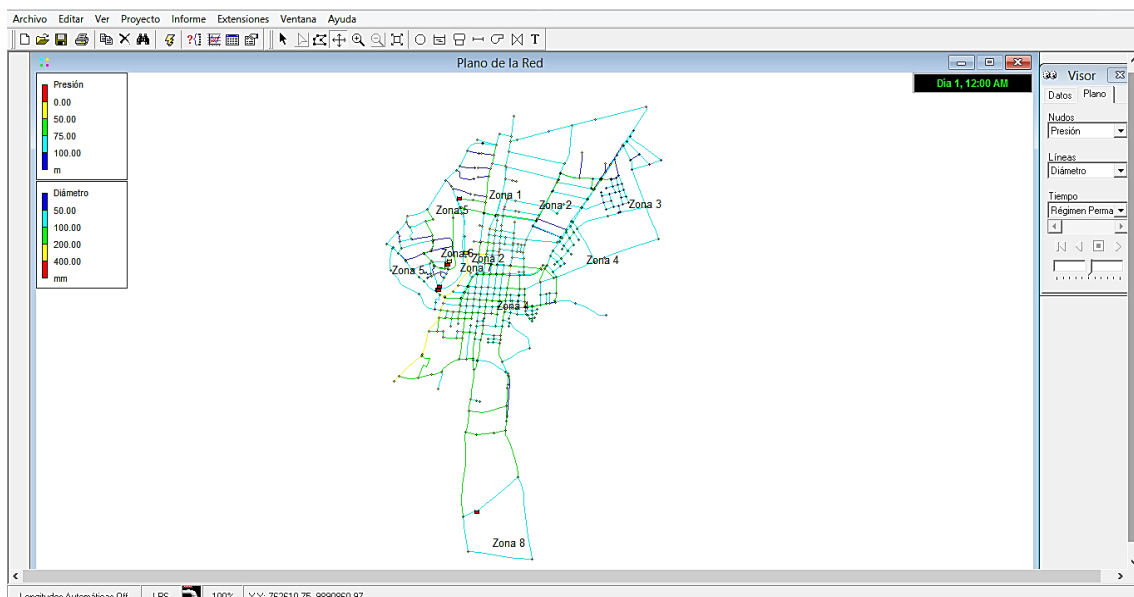
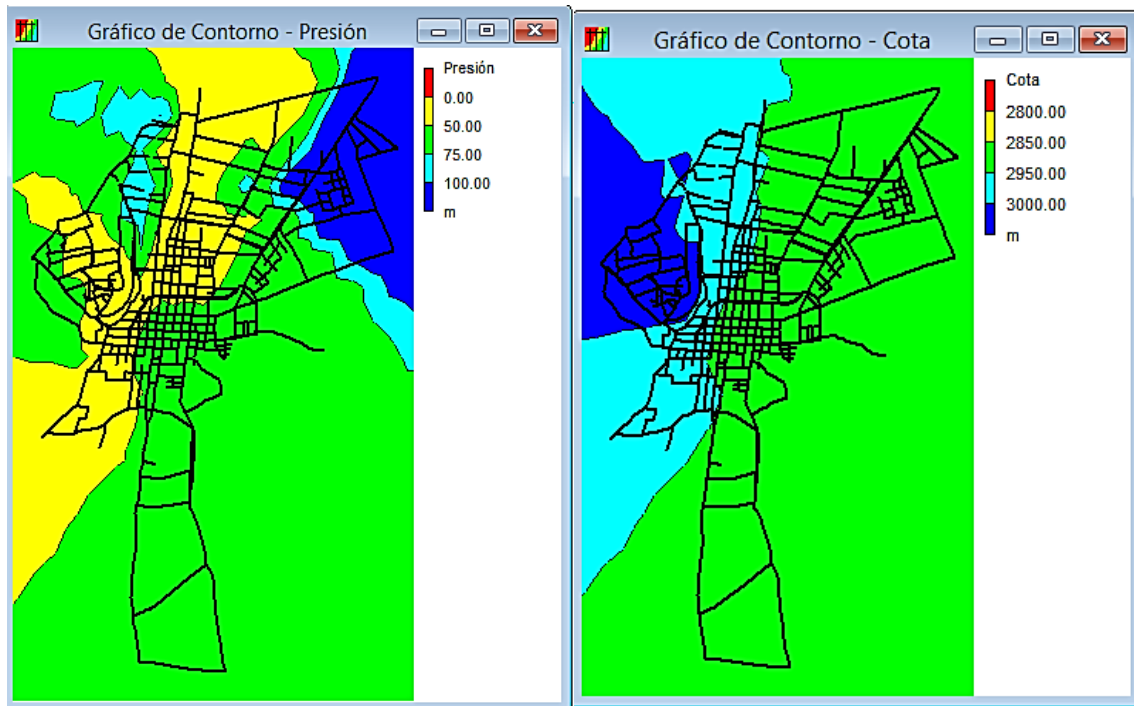


Figura 71 Modelo en Epanet Zonificada.

Tras la simulación del funcionamiento de la red en condiciones estáticas, la siguiente figura muestra las presiones para una hora media de consumo. Se puede observar cómo las zonas con menor cota están expuestas a presiones más elevadas, mientras que las zonas más cercanas a los embalses están a presiones menores. Las presiones varían entre 20 y valores superiores a 100 mca en una zona mínima de la red.



*Figura 72 Resultados de presión y cota en Epanet.*

En resumen en este modelo se asumió un densidad poblacional uniforme en toda el área de estudio, también se asumió una demanda aproximada ya que la empresa solo compartió hasta este punto la información del total de usuarios, con esta información se asignó un caudal medio a cada nudo de consumo para lo cual se empleó los polígonos de Thiessen, también se procedió a sectorizar la red de acuerdo al embalse de alimentación y se colocó las etiquetas de cada sector en el modelo de Epanet para facilitar de mejor manera su identificación, con esto se pudo afinar en gran medida el modelo, pero todavía no representa la situación real en la red por lo que es necesario seguir trabajando en el modelo.



### 3.3 ASIGNACIÓN DEL CONSUMO MEDIO DE ACUERDO AL REPORTE MENSUAL DE AGUA FACTURADO

A continuación se presenta las etapas para la asignación de las demandas de acuerdo al caudal facturado por la EPAPAP, para lo cual se inicia con el volumen facturado mensual, y la zonificación de la ciudad en base a la diferente densidad poblacional, seguidamente se realiza el respectivo cálculo de las demandas por zonas para trazar polígonos que identifique las zonas y asignar el caudal correspondiente a cada nudo de consumo.

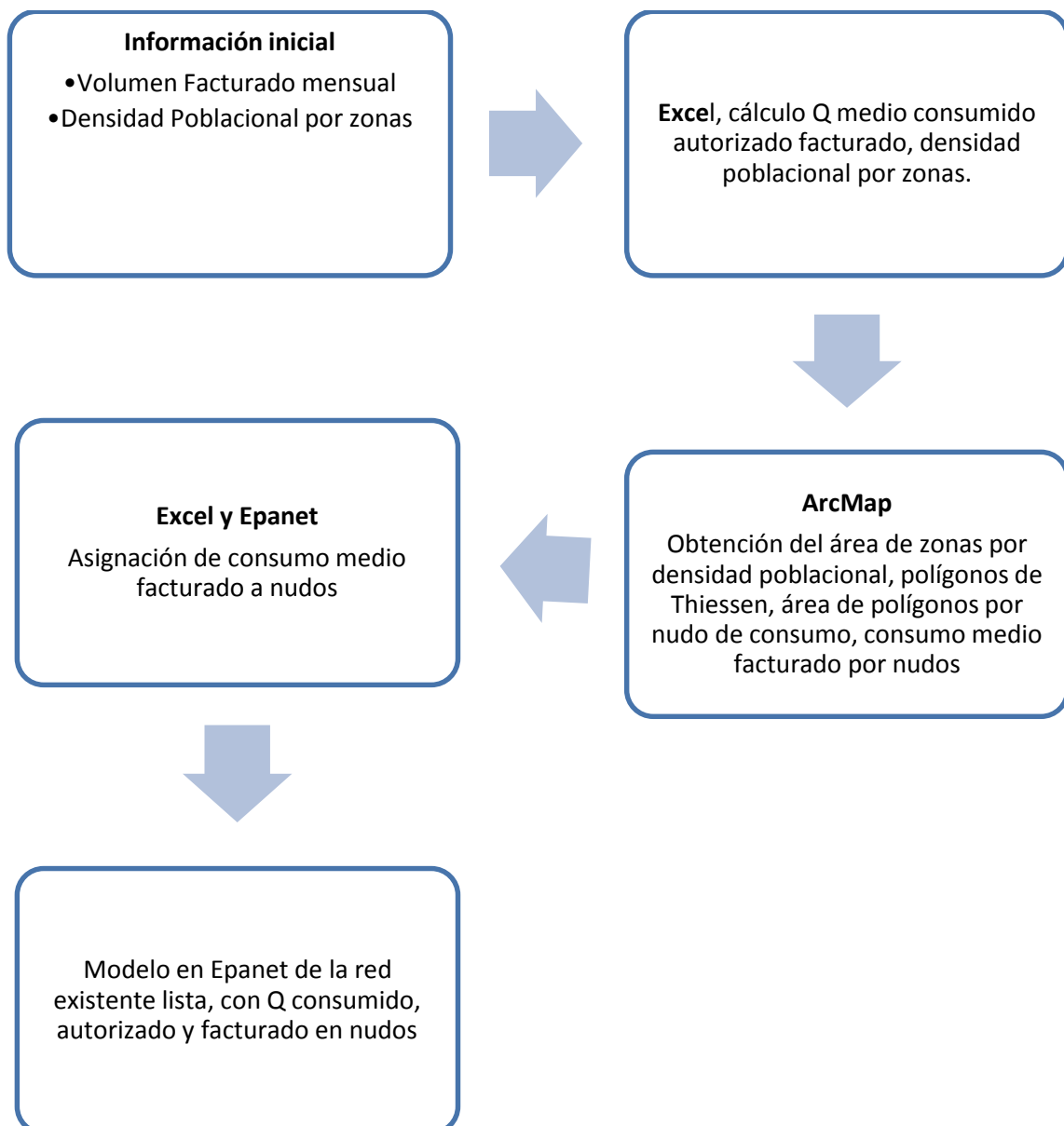


Figura 73 Etapas de asignación de consumo medio facturado a nudos del Modelo.

### 3.3.1 INFORMACIÓN INICIAL

En este punto la empresa EPAPAP suministro información del volumen total facturado al mes, por lo que ya no es necesario estimar la dotación como se lo realizó anteriormente, esto permite en cierta medida mejorar el modelo ya que asignaremos el consumo medio facturado reportado por la empresa, sin embargo la información obtenida no especifica el consumo medio facturado por usuario, por lo que es necesario repartir el consumo medio facturado de acuerdo a la densidad poblacional de la ciudad, esto permitirá la obtención de un modelo más robusto al momento de la simulación.

Se utiliza para la carga hidráulica del modelo la información aportada por la empresa, en la cual se detalla el volumen mensual de agua facturada y la recaudación (Tabla 13).

Tabla 13 Reporte mensual EPAPAP

EMPRESA PÚBLICA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE PUJILÍ (EPAPAP)	
REPORTE DE EMISIÓN MENSUAL GENERAL	
Cotopaxi/Pujilí/Juan Salinas s/n y Simón Bolívar	
Fecha:10/09/2018	
Mes:	Agosto
Emisión mensual general	
Total Consumo (m <sup>3</sup> ):	92,767
Total facturado:	\$ 37,832.92

Con la información anterior se realiza el ajuste de la dotación que para el primer caso se estimó de 200 l/habitante/ día; una vez realizado el reajuste se obtuvo la nueva dotación que corresponde a 146.84 l/habitante/ día (Tabla 14).

Tabla 14 Datos empresa EPAPAP

Caudal demandado		
Total de habitantes con servicio=	21,057	habitantes
Consumo (V demandado) =	92,767	m <sup>3</sup> /mes
Consumo (Q demandado)=	35.79	l/s
Dotación=	146.84	l/habitante/día

De acuerdo a la información de la empresa la demanda unitaria es de 146.84 l/habitante/día, con esta información se recalculan los consumos medios en los nudos.

Por otra, parte con ayuda de google Earth, se visualiza la ciudad de Pujilí y la ubicación de los nudos de consumo (Figura 74). Se observa que la densidad poblacional a lo largo del área del proyecto es diferente, razón por lo que se consultó al Gobierno Descentralizado del Cantón Pujilí, el cual facilitó la sectorización de la ciudad de acuerdo a su densidad poblacional.

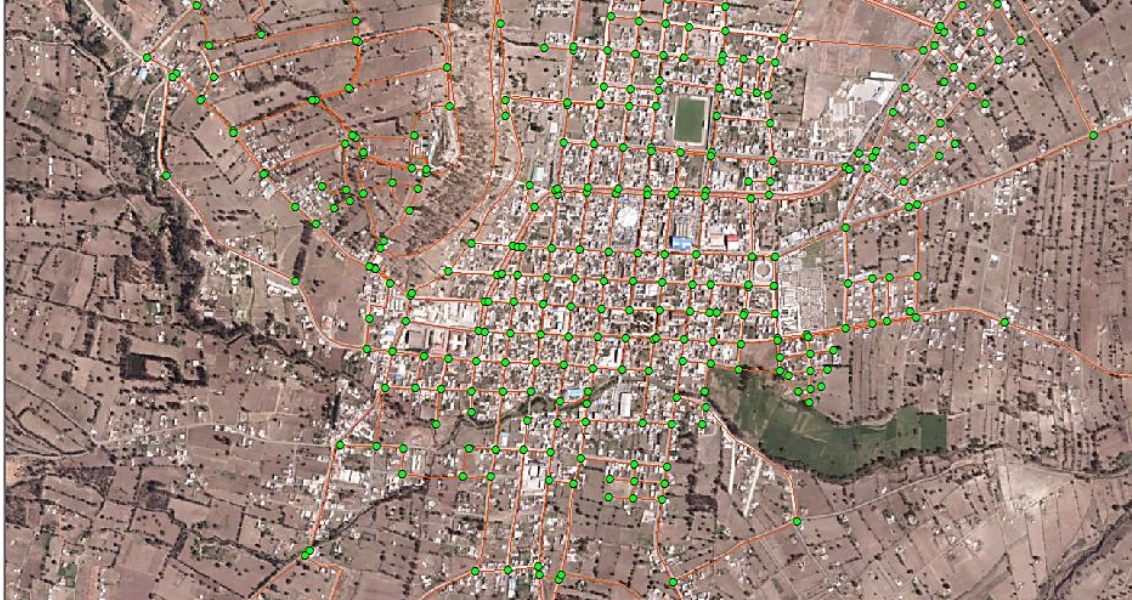


Figura 74 Fotografía Satelital de la ciudad de Pujilí.

La siguiente tabla muestra la densidad poblacional de la ciudad de Pujilí, para cada uno de los sectores (designados de 0 a 8). Estos datos han sido obtenidos con el reporte del censo poblacional y de vivienda realizado en el año 2010, para la zonificación del proyecto analizado se toma los mismos (Tabla 15).

Tabla 15 Porcentaje de distribución de habitantes por sector

Sector	(Ha)	Población (habitantes)	Densidad (hab /Ha)	% Habitantes por zona
0	39.81	127	3.19	0.010
1	75.11	1,418	18.88	0.116
2	86.19	1,367	15.86	0.112
3	44.74	2,525	56.44	0.207
4	73.20	2,344	32.02	0.192
5	67.90	787	11.59	0.064
6	124.19	1,761	14.18	0.144
7	39.81	127	3.19	0.010
8	162.06	1,747	10.78	0.143
Total		12,203		1.000

En la columna (% habitantes por zonas) de la tabla, nos indica el porcentaje respecto al total de la población censada que corresponde a cada sector, en base a esta información se procede a zonificar el área de estudio, para la asignación del consumo medio facturado a los nudos.

### 3.3.2 ASIGNACIÓN DE DEMANDAS A NUDOS POR ZONAS DE DISTINTA DENSIDAD POBLACIONAL

Esto permitirá distribuir el caudal medio consumido facturado de acuerdo a la densidad poblacional de la ciudad, para esto se inicia calculando el consumo medio por cada zona de diferente densidad poblacional, se consideró el consumo medio facturado total de 35.79 l/s y el porcentaje de distribución del total de la población por sector ver Tabla 16.

Tabla 16 Demandas por Zonas de diferente densidad poblacional.

Sector	% Habitantes por zona	Total (habitantes con servicio de agua)	Población por zona	Dotación (EPAPAP)(l/ha b/día)	Q consumo medio por zona (l/s)
Numero	a	b	c=a*b	d	$f=c*d/(24*60*60)$
0	0.010	21,057	219	146.85	0.37
1	0.116	21,057	2,446	146.85	4.16
2	0.112	21,057	2,358	146.85	4.01
3	0.207	21,057	4,357	146.85	7.41
4	0.192	21,057	4,044	146.85	6.87
5	0.064	21,057	1,358	146.85	2.31
6	0.144	21,057	3,038	146.85	5.16
7	0.010	21,057	219	146.85	0.37
8	0.143	21,057	3,014	146.85	5.12
Total	1.000		21,057		35.79

A continuación se procede a la creación de la zonificación del área de estudio, para esto se utiliza el programa AutoCad y con ayuda de la información otorgado por él GADMCP se zonifica la planimetría de la red ver Figura 75.



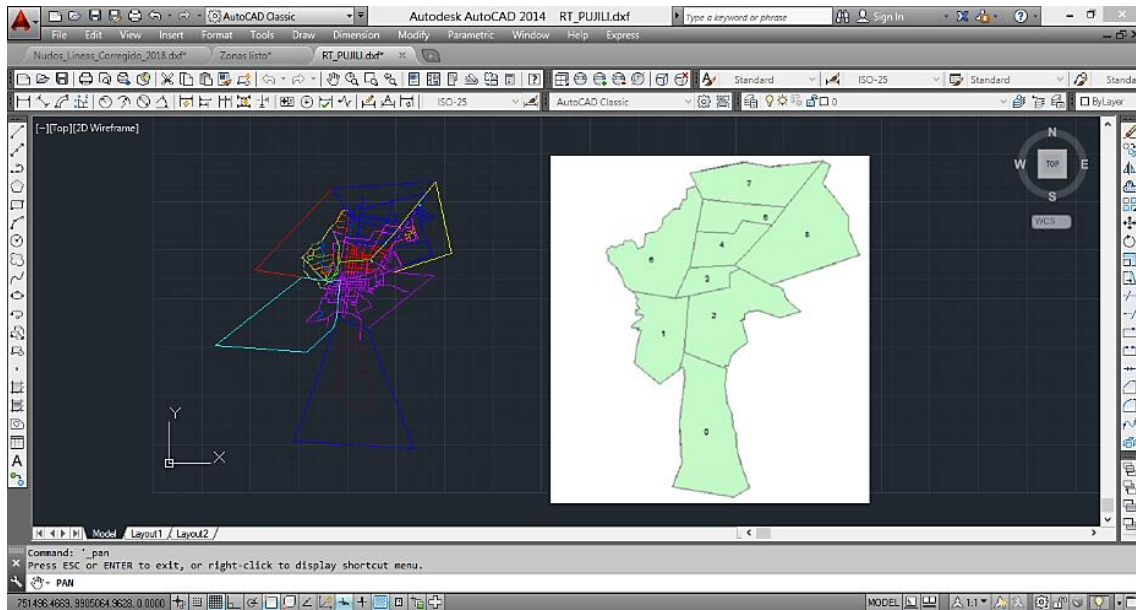


Figura 75 Zonificación en Autocad.

Una vez generado la zonificación en Autocad se selecciona los polígonos creados y se lleva a una nueva hoja de trabajo, se guarda en formato .dxf, para trabajar en ArcMap, posteriormente se abre el documento anteriormente creado y se asigna el sistema de proyección geográfica del proyecto, para esto se utiliza las herramientas de ArcMap (Figura 76).

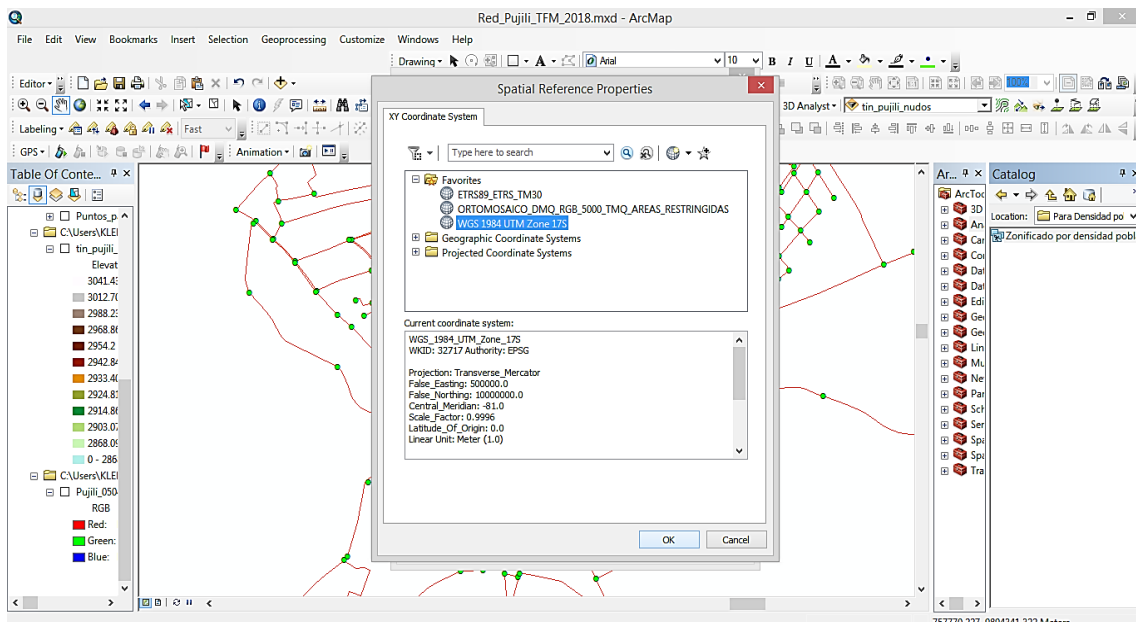


Figura 76 Asignación de sistema de proyección geográfica a zonificación.

Después se transforma el archivo de la zonificación a un formato (.shp) para trabajar en el programa ArcMap, también es necesario recortar el archivo de la zonificación con



referencia al contorno del área del proyecto, esto permite tener una exactitud al momento del cálculo de las áreas de los polígonos (Figura 77).

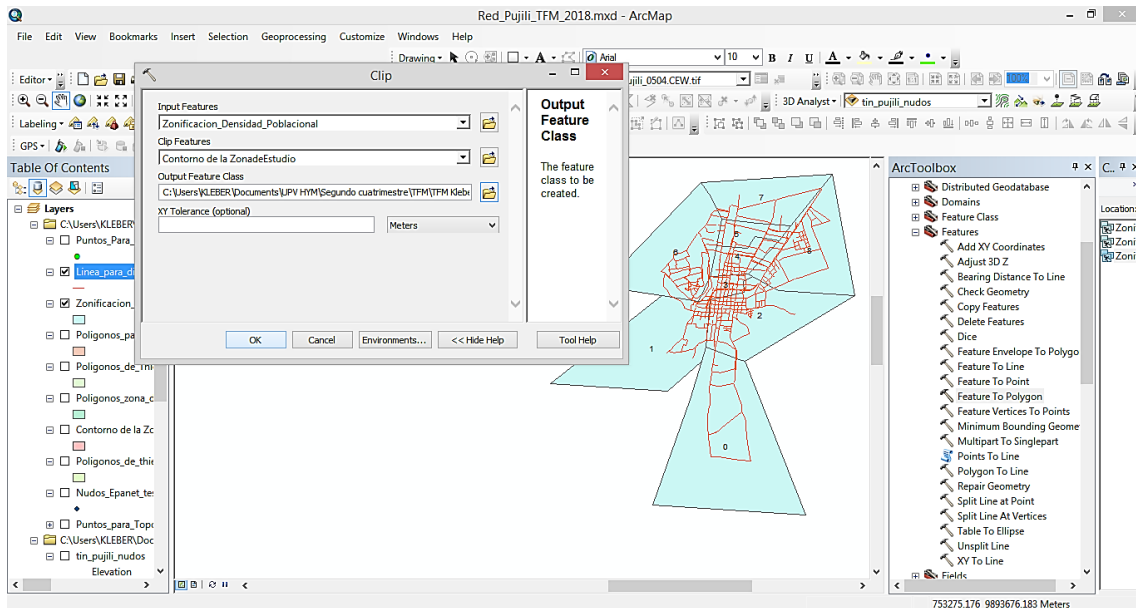


Figura 77 Recortar Zonificación con contorno del área de estudio.

Una vez que se ha recortado los polígonos, para visualizar de mejor manera se identifican con diferentes colores y se asigna el nombre correspondiente ver Figura 78.

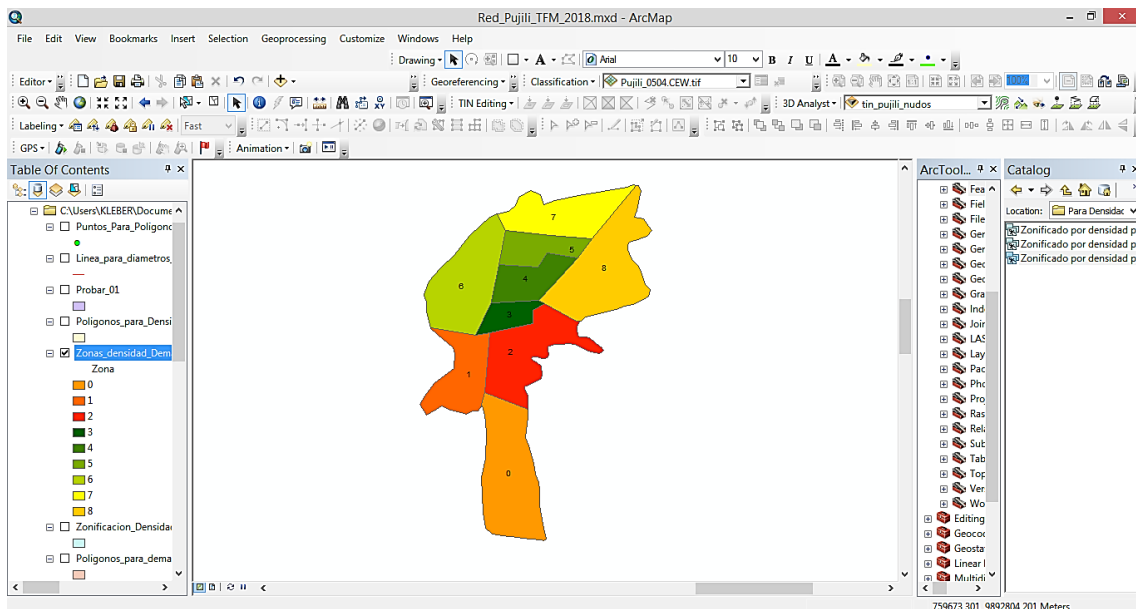


Figura 78 Zonificación de acuerdo al área de estudio.

Luego en la tabla de atributos de la capa de zonificación se añade 3 nuevas columnas, la primera para colocar la identificación de la zona, la segunda para consumo medio facturado por zona y la tercera para calcular el área de cada zona (Figura 79).

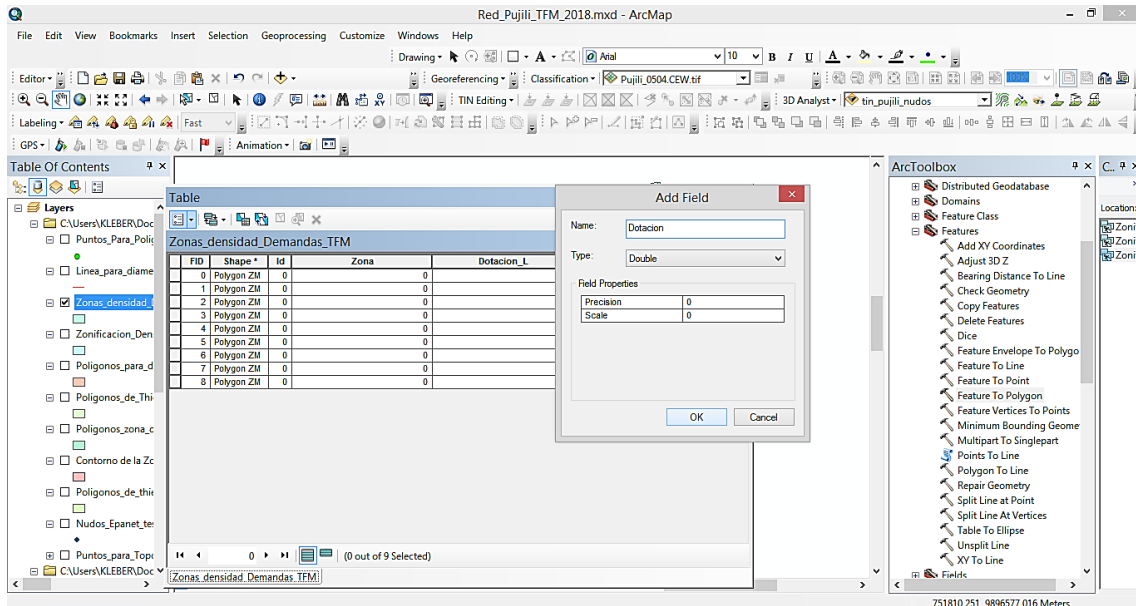


Figura 79 Creación de nuevas columnas en la tabla de atributos de la zonificación.

Una vez creada las columnas lo que se realiza a continuación es la edición de las mismas, para lo cual es necesario activar el modo edición en el programa ArcMap; en la columna identificación se coloca el nombre de cada zona (Figura 80).

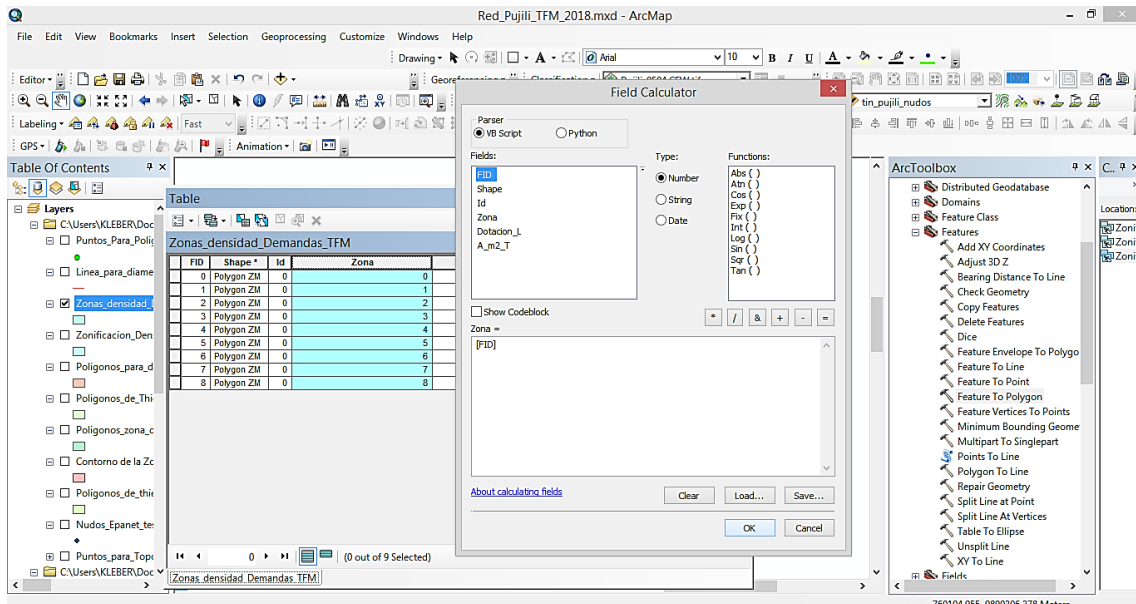


Figura 80 Colocación del número de zona.

Así mismo para la columna que contiene el consumo medio facturado se ingresa las correspondientes a cada zona las cuales fueron calculadas anteriormente. Una vez

ingresada la información en cada columna se guarda los cambios y se detiene el modo edición en el programa ArcMap, también es necesario verificar la información ingresada en cada columna para ello se utiliza la hoja de Excel donde está la información (Figura 81).

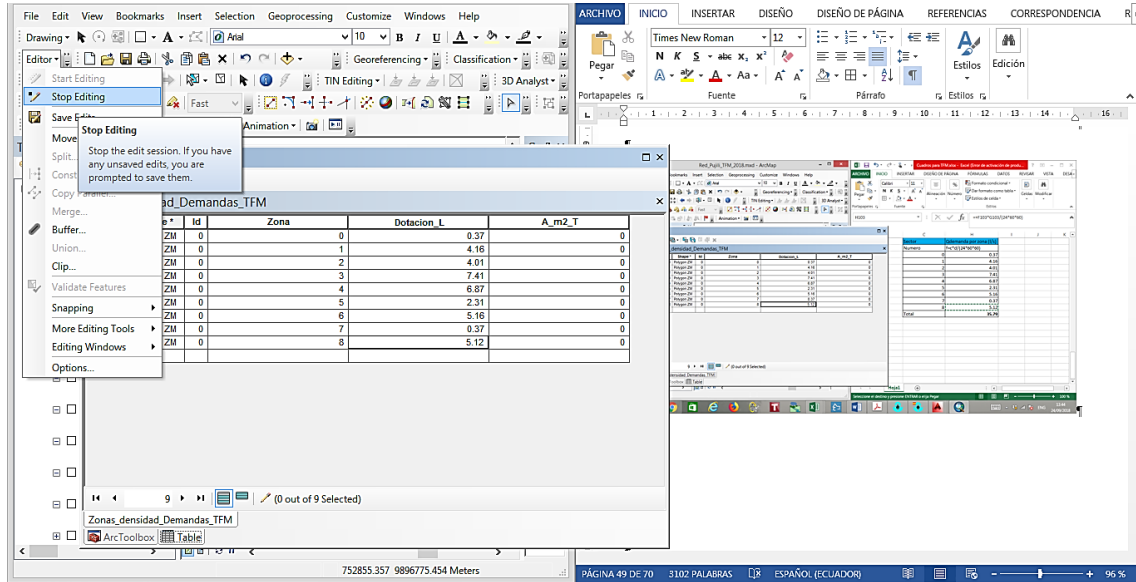


Figura 81 Consumo medio facturado Ingresado, edición terminada.

Por otra parte para el cálculo de las áreas de cada zona es necesario realizarlo con ayuda de la calculadora geométrica del programa, donde se necesita seleccionar la columna que corresponde al área y se solicita el reporte de la información (Figura 82).

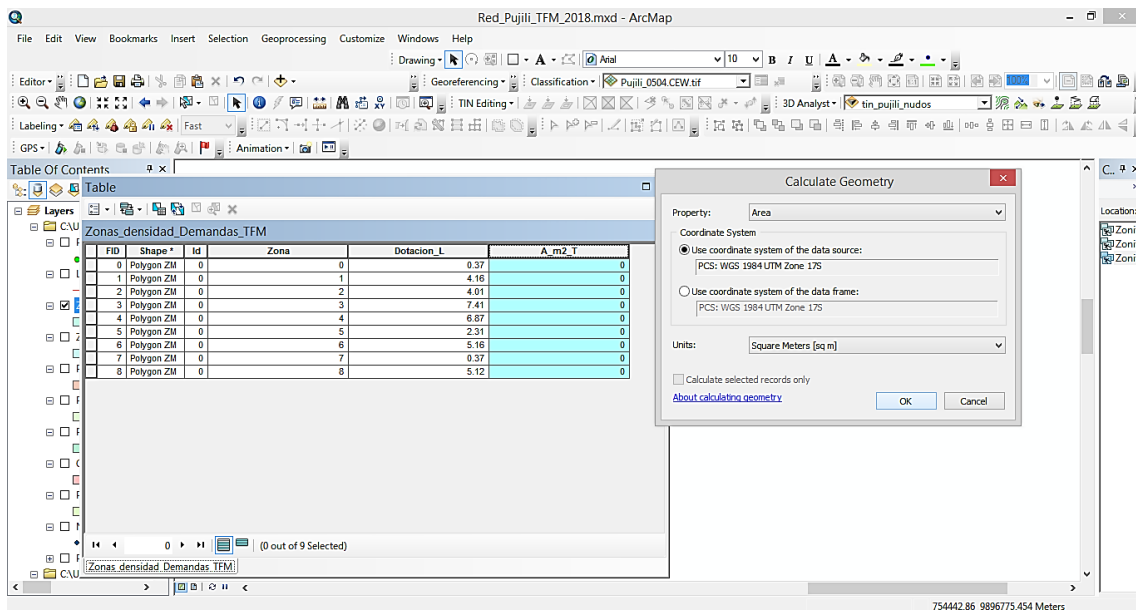


Figura 82 Cálculo de áreas de cada zona.

Con el fin de controlar que los datos del consumo medio facturado por zona ingresados anteriormente sean los correctos se verifican las sumatorias de cada columna, esta sumatoria debe ser la misma calculada en el Excel ver Figura 83.

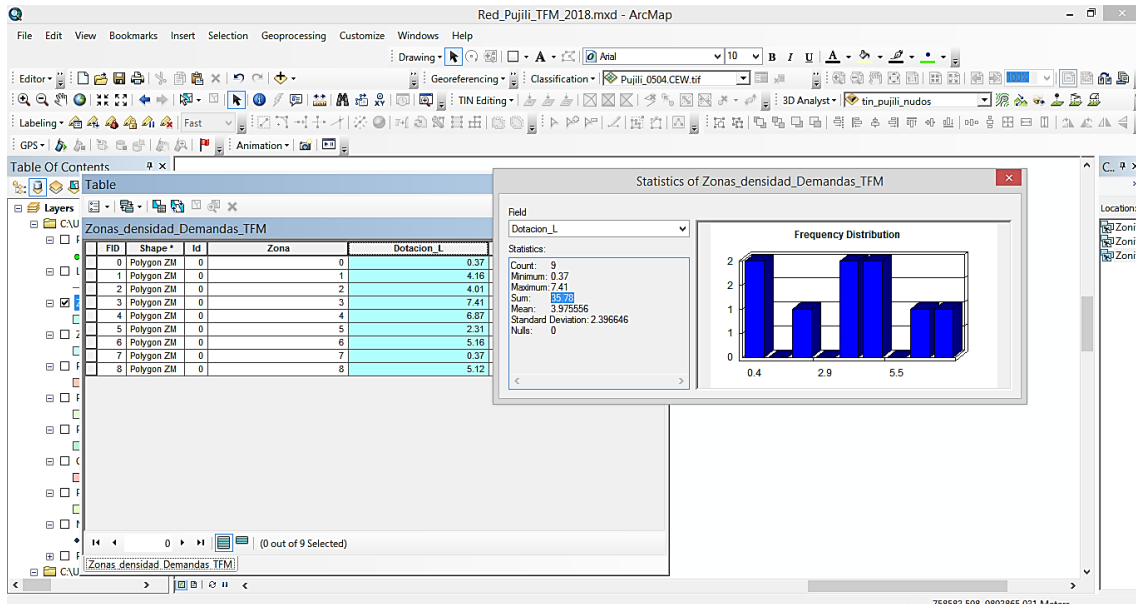


Figura 83 Verificación del total de consumo medio facturado Ingresada.

Para el caso del área calculado por zonas se verifica que la sumatoria sea la misma del área de estudio, esto permitirá que no exista ningún error al momento de distribuir el caudal a cada nudo de consumo (Figura 84).

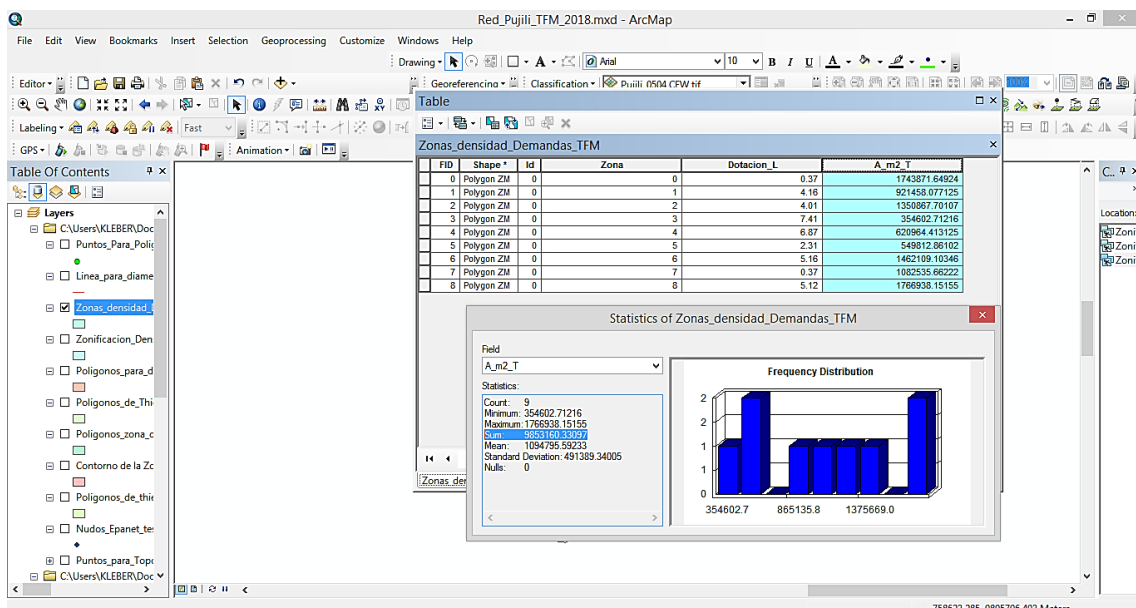


Figura 84 Verificación del área total de las zonificaciones.

A continuación se crea una copia de la capa polígonos la versión que se encuentra recortada de acuerdo al área del proyecto, para ello se utiliza las herramientas del programa ArcMap. Luego se edita la tabla de atributos de la capa copiada, en la que se quita las columnas que contiene información del cálculo de las demandas con densidad uniforme utilizada en los pasos anteriores (Figura 85).

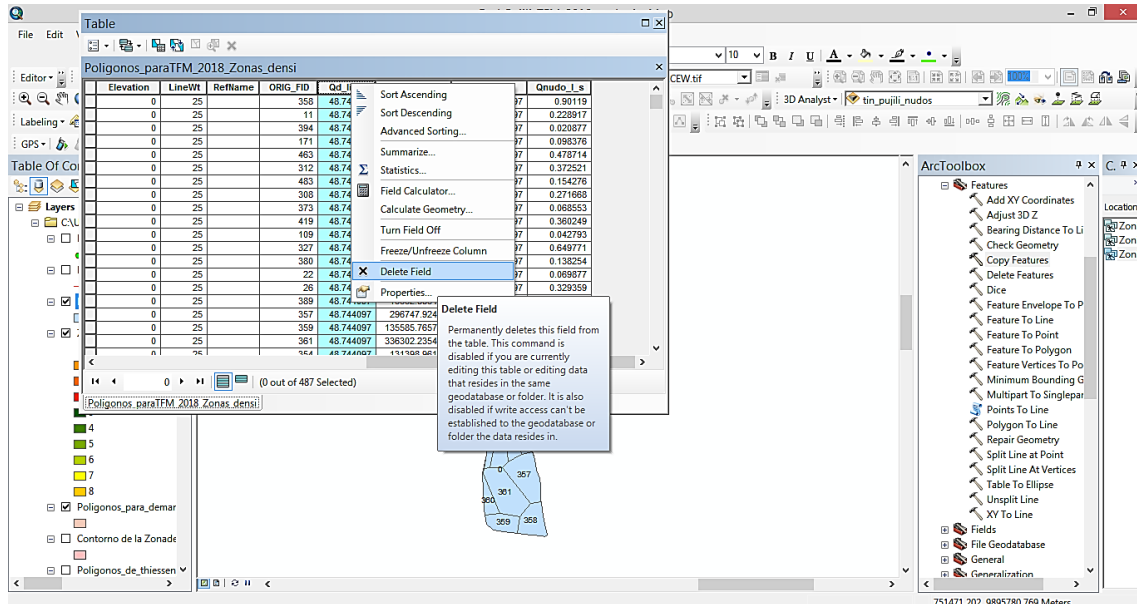


Figura 85 Edición de la capa copiada polígonos.

Después se procede a interceptar las 2 capas, por un lado la que contiene la zonificación y por otro la que contiene los polígonos de cada nudo de consumo tal como se ve a continuación.

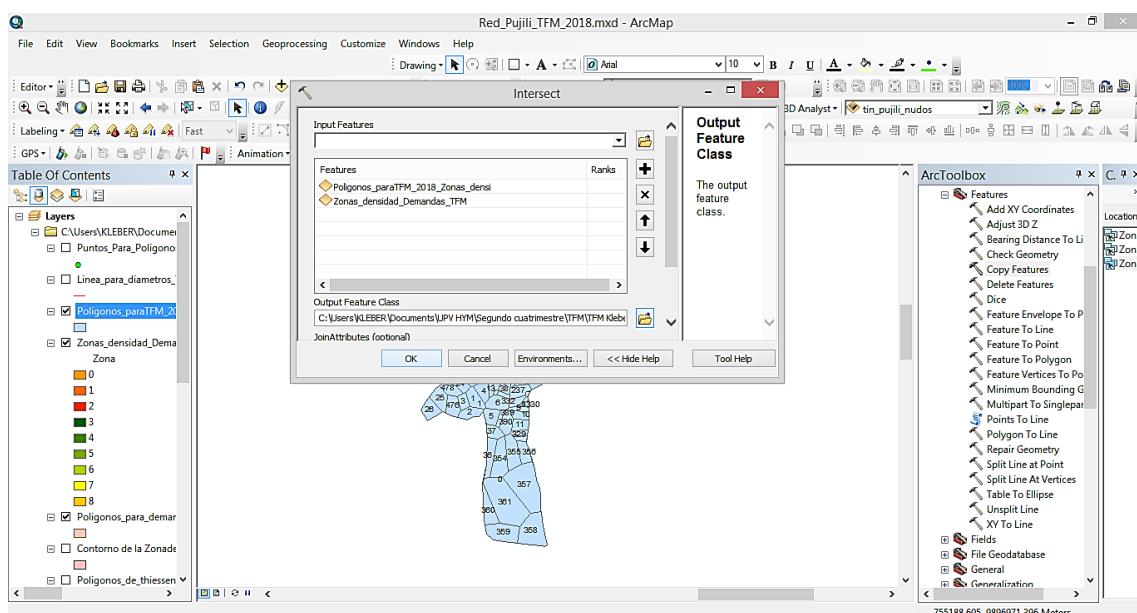


Figura 86 Delimitar zonas y polígonos.



Una vez finalizada la intercepción se puede visualizar tanto los nudos como los polígonos recortados de acuerdo a la zonificación por densidades, también es necesario asignar una gama de colores que identifique de mejor manera las distintas zonas (Figura 87).

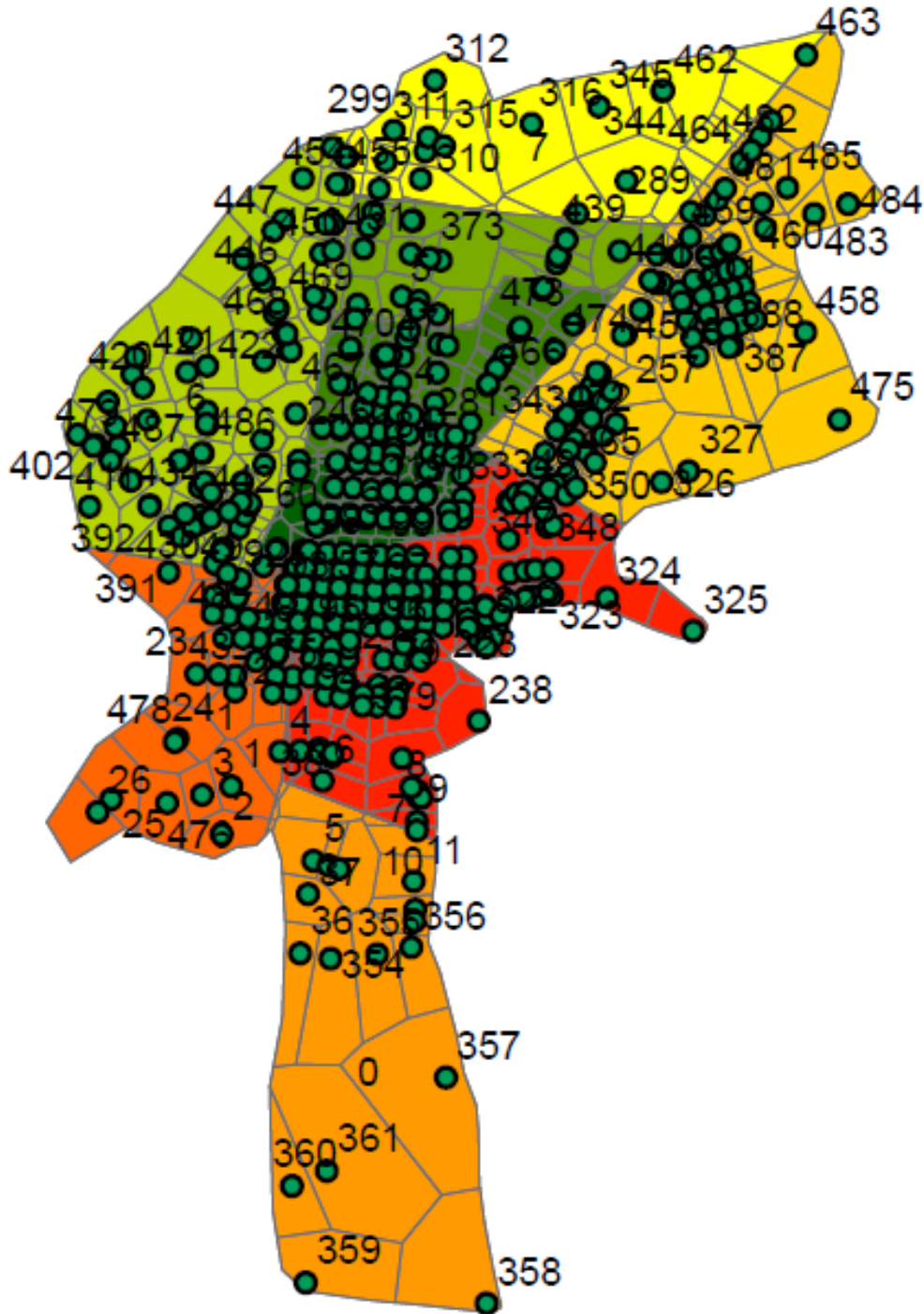


Figura 87 Polígonos delimitados por zonas.

Posteriormente se procede a revisar la tabla de atributos del nuevo archivo creado, en la cual consta la columna nombre de la zona, consumo medio facturado, área de cada zona, adicional a ello se crea una columna para el cálculo de las nuevas áreas creadas

dentro de cada zona, así como también una columna para el cálculo del consumo medio facturado que será asignado a cada nudo de consumo (Figura 88).

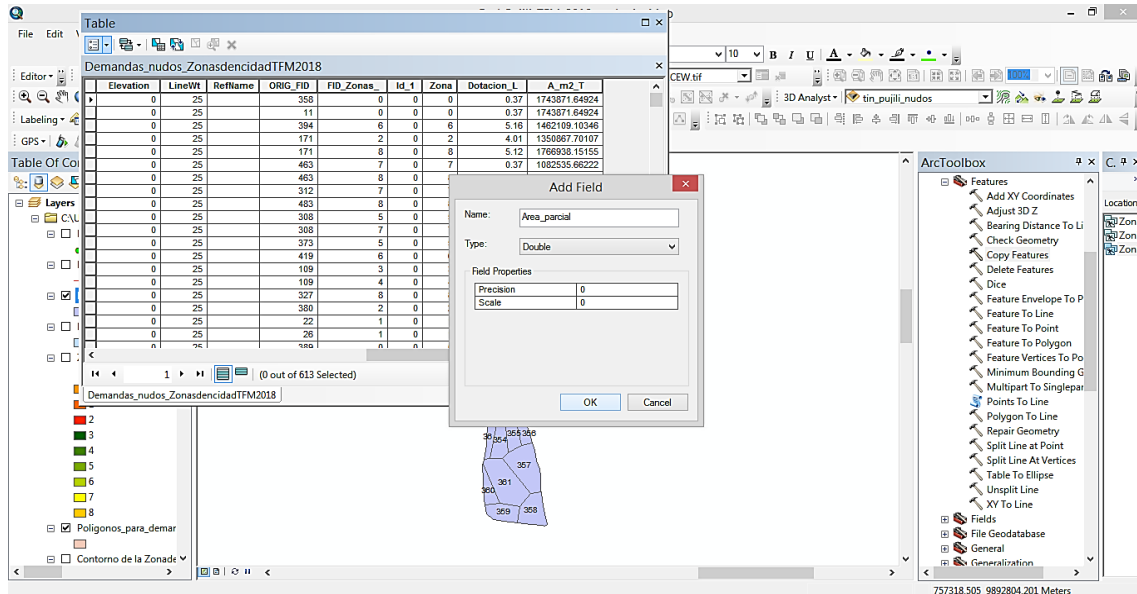


Figura 88 Creación de nuevas columnas en tabla de atributos por zonas.

A continuación se utiliza la calculadora de la geometría del programa para determinar el área parcial y llenar la columna correspondiente; por el contrario para el cálculo en la columna del consumo medio facturado se procede a escribir la ecuación (5) en la calculadora (Figura 90).

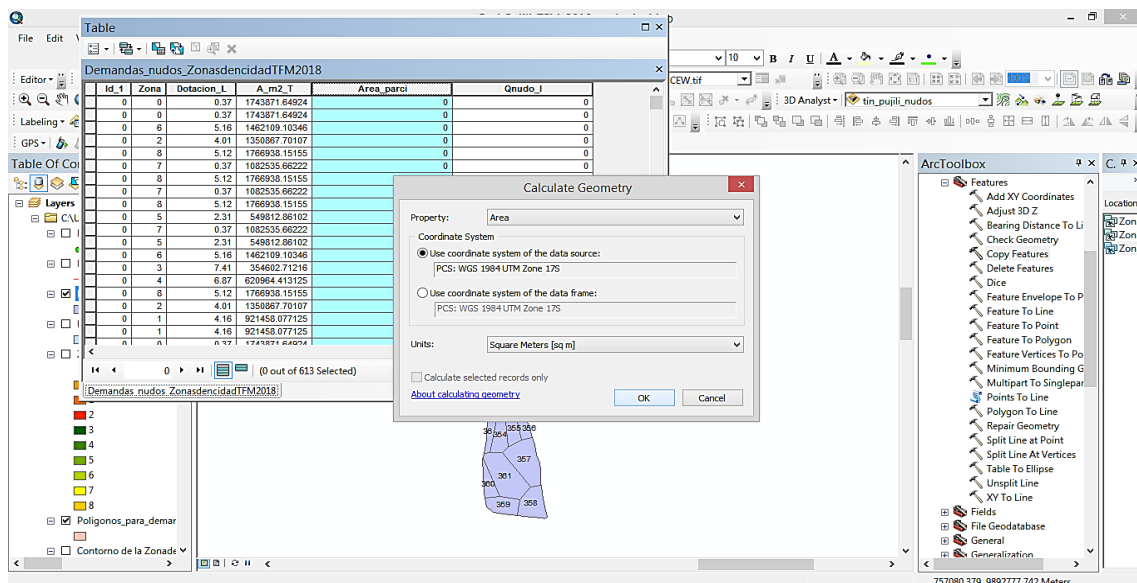


Figura 89 Cálculo de áreas parciales.

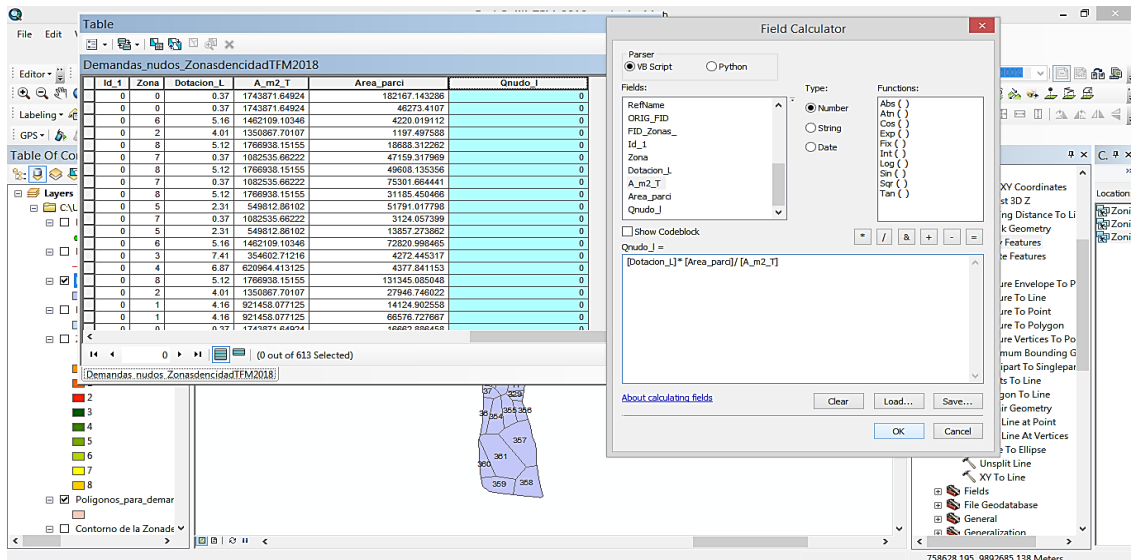


Figura 90 Cálculo de consumo medio facturado por nudos.

Terminado el cálculo de los consumos medios facturados por nudos, se puede visualizar la zonificación a la que pertenece cada nudo como se visualiza en la siguiente figura.

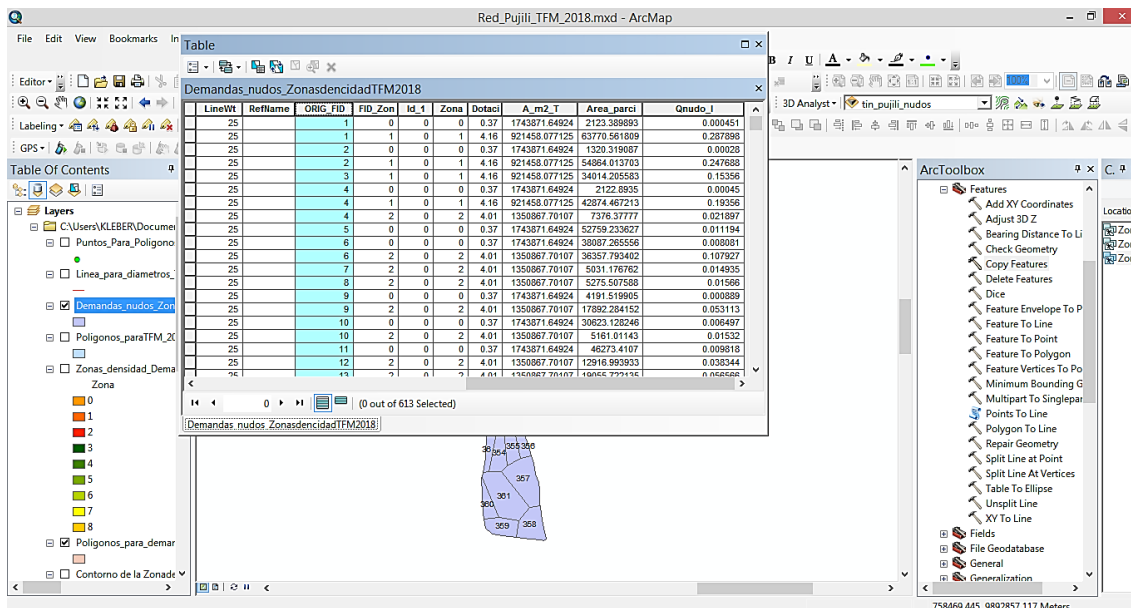


Figura 91 Consumo medio facturado calculado por cada nudo y zonificada.

Finalmente se procede a asignar el consumo medio facturado a los nudos del modelo de Epanet, para lo cual es necesario exportar la tabla de atributos del archivo de ArcMap a Excel. También es necesario recordar que en la columna **ORIG\_FID** se encuentra el identificador de los nudos de Epanet (Figura 92).

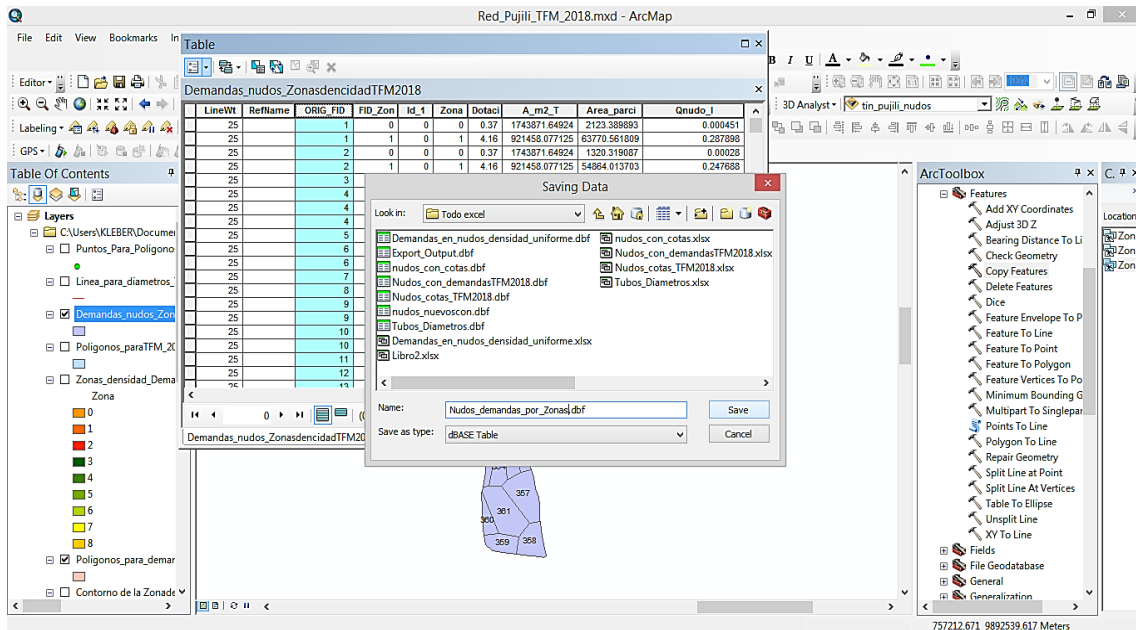


Figura 92 Exportar la tabla de atributos al Excel.

Por otra parte la información de la red del modelo de Epanet también se exporta al Excel, una vez con la información en el Excel y con ayuda de las funciones se suma y se asigna a cada nudo el caudal medio consumido facturado correspondiente como se visualiza a continuación.

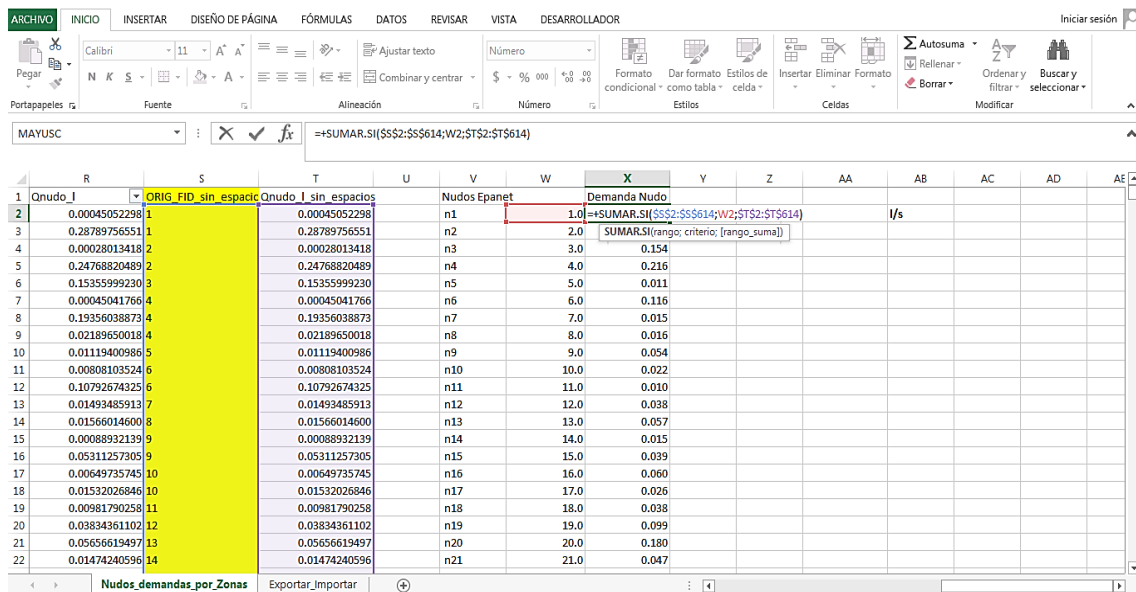


Figura 93 Asignación de consumo medio facturado a cada nudo de Epanet

Otro aspecto importante una vez asignado el consumo medio facturado a los nudos es cotejar los valores de los nudos entre los programas ArcMap y Epanet, este procedimiento es necesario para evitar errores en los cálculos posteriores (Figura 94).



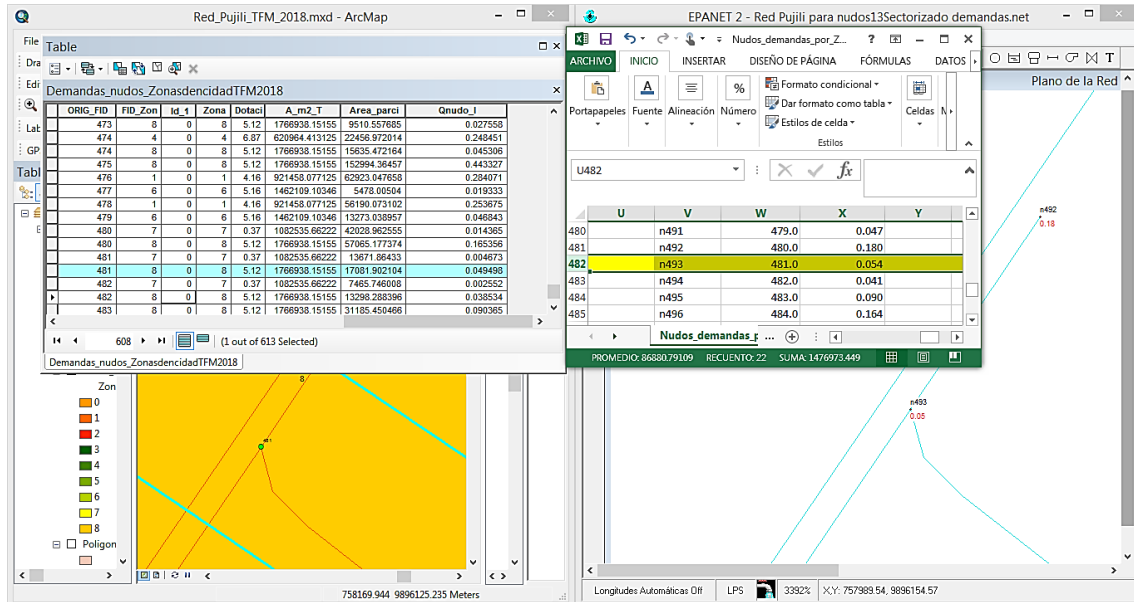


Figura 94 Comparación de Información de ArcMap y Epanet.

Finalmente se tiene un modelo de la red existente en Epanet con consumos medio facturado en los nodos de consumo distribuidas de acuerdo a la zonificación por densidad poblacional de la ciudad que se aproxima mejor a la realidad (Figura 95).

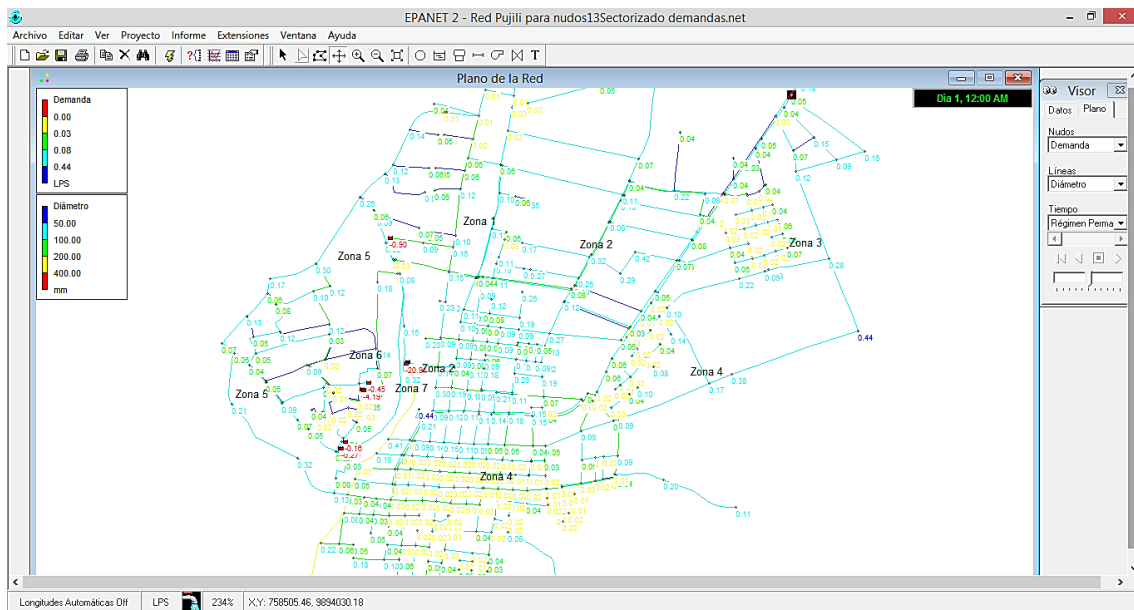


Figura 95 Modelo de Epanet con consumo medio facturado.

En resumen se obtuvo un modelo en Epanet que tiene cargado el consumo medio facturado en los nodos de acuerdo a los datos de la EPAPAP, distribuido por zonas de diferente densidad poblacional, pero hasta este punto solo tenemos el caudal medio facturado, sin embargo en un sistema de agua potable existe los siguientes caudales, Q consumido, autorizado y facturado, Q consumido, autorizado y no facturado, Q de fugas y Q inyectado.



### 3.4 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN CONSUMIDO, AUTORIZADO Y NO FACTURADO

A continuación se detalla el procedimiento seguido para la asignación del volumen consumido autorizado y no facturado, el cual inicia por la identificación y ubicación de las instituciones que no pagan el agua, seguido del cálculo de la demanda, posteriormente se ubica estas instituciones en la planimetría de la ciudad para visualizar los nudos que los suministra a los cuales se sumara la demanda.

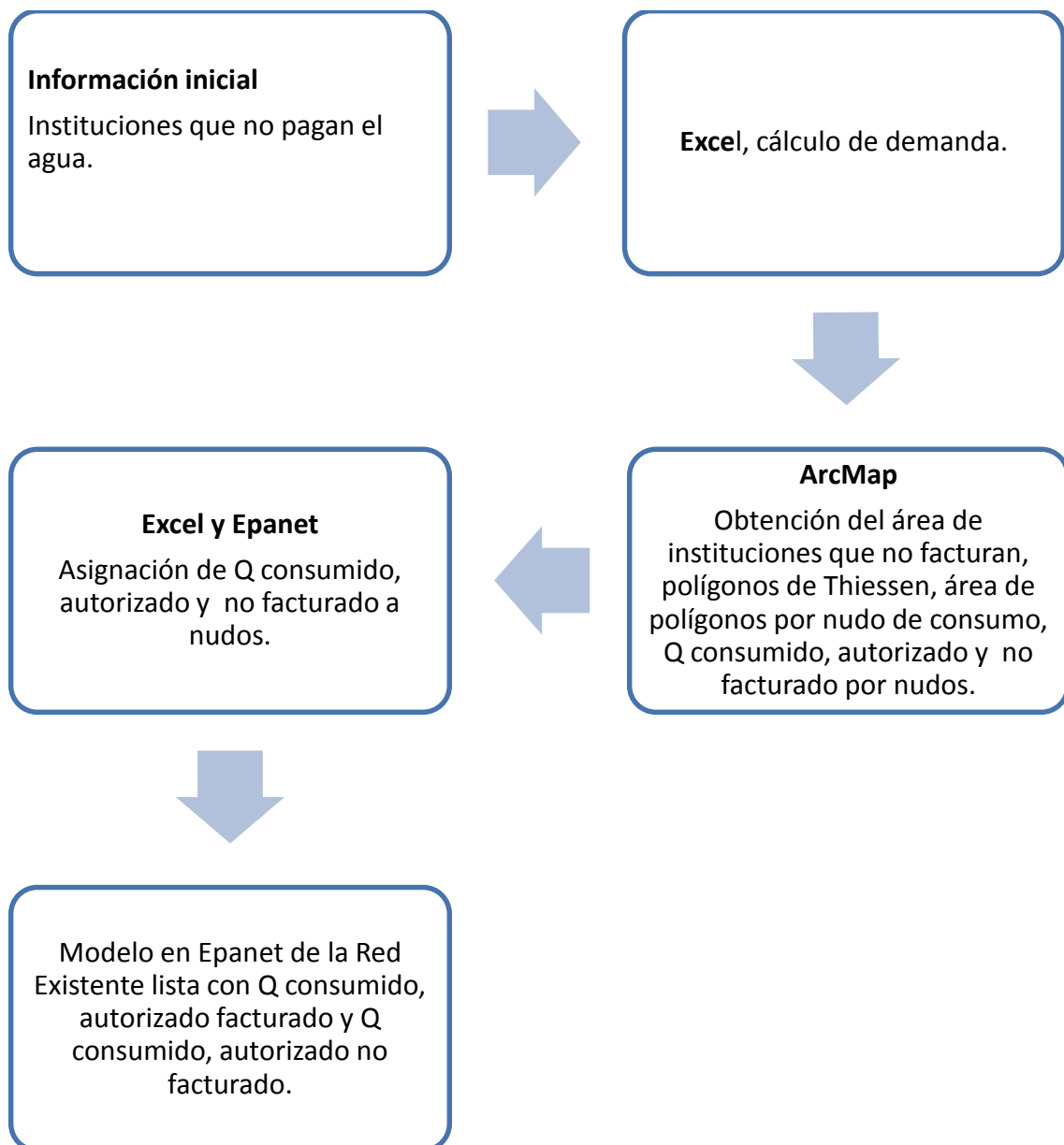


Figura 96 Etapas para determinar el volumen consumido, autorizado no facturado.

### 3.4.1 INFORMACIÓN INICIAL

La empresa indica que las instituciones educativas, de salud, la Municipalidad y las plazas y mercados no pagan por el agua que utilizan, por lo que se persigue la determinación del caudal consumido, autorizado y no facturado, asociado a estos consumidores.

Debido a que no existen contadores en las instituciones que no pagan el servicio de agua potable, fue necesario estimar su consumo, para lo cual se utilizó la dotación sugerida por la "Norma Hidrosanitaria Ecuatoriana en el capítulo 16" (ver Tabla 17).

Tabla 17 Dotación por uso Norma Ecuatoriana hidrosanitaria.

Dotaciones para edificaciones de uso específico		
Tipo de edificación	Unidad	Dotación
Escuelas y Colegios	L/estudiante/día	20 a 50
Hospitales	L/cama/día	800 a 1300
Mercados	L/puesto/día	100 a 500
Oficinas	L/personas/día	50 a 90

A partir de la dotación de cada tipo de usuarios se identifican las instituciones que no facturan el agua potable, esto es posible gracias a la información aportada por el GADMCP.

#### Centros educativos

El consumo autorizado no facturado de las instituciones educativas se estima a partir de las ecuaciones aportadas por la normativa anterior (Ver tabla 17). A partir de los cálculos realizados se estima un caudal total de 4.21 l/s.

Tabla 18 Consumo de centros educativos.

N°	NOMBRE DE LA INSTITUCIÓN	N° ESTUDIANTES (a)	Q consumido, autorizado y no facturado		
			Dotación (l/estudiante/día) (b)	Q demandado (l/s) $C = a*b/(86400)$	V (m³/mes) $D = a*b*0.03$
1	Unidad Educativa "Belisario Quevedo"	2311	50	1.34	3,466.50
2	Unidad Educativa "Provincia de Cotopaxi"	2650	50	1.53	3,975.00

3	Unidad Educativa "Pujilí"	1125	50	0.65	1,687.50
4	Unidad Educativa "Inés Cobo Donoso"	540	50	0.31	810.00
5	Escuela Particular "Santa Mariana de Jesús"	357	50	0.21	535.50
7	Centro César Francisco Naranjo "Semillitas"	300	50	0.17	450.00
TOTAL=		7283		4.21	10,924.5

### Oficinas Municipales

De forma similar, se estima el caudal correspondiente a las oficinas municipales, resultando éste 0.34 l/s la demanda autorizada no facturada (Tabla 19).

Tabla 19 Consumo de oficinas municipales.

N°	NOMBRE DE LA INSTITUCIÓN	N° FUNCIONARIOS (a)	Q consumido, autorizado y no facturado		
			Dotación (l/persona/día) (b)	Q demandado (l/s) C= a*b/(86400)	V (m³/me) D=a*b*0.03
1	Municipio del Gobierno Descentralizado de Pujilí	326	90	0.34	880.20
TOTAL=		326	90	0.34	880.20

### Hospital

En el caso del hospital de la ciudad, la demanda autorizada no facturada es de 0.14 l/s (Tabla 20).

Tabla 20 Consumo de Centros de salud.

N°	NOMBRE DE LA INSTITUCIÓN	N° Camas (a)	Q consumido, autorizado y no facturado		
			Dotación (l/cama/día) (b)	Q demandado (l/s) C= a*b/(86400)	V (m³/mes) D=a*b*0.03
1	Hospital Rafael Ruiz	15	800	0.14	360.00
TOTAL=		15		0.14	360.00

### Plazas y mercados

Finalmente, para las plazas y mercados de la ciudad, la dotación autorizada no facturada es de 6 l/s (Tabla 21).

En resumen el caudal Q consumido, autorizado y no facturado suma un total de **10.69 l/s**, este caudal tiene que ser distribuido a los nudos que estén en la zona de cada institución.

Tabla 21 Consumo de Plazas y Mercados

N°	NOMBRE DE LA INSTITUCIÓN	N° Puestos (a)	Q consumido, autorizado y no facturado		
			Dotación (l/puesto/día) (b)	Q demandado (l/s) C= a*b/(86400)	V (m³/mes) D=a*b*0.03
1	Plaza Sucre	642	450	3.34	8,667.00
2	Plaza Luis Felipe Chávez	39	450	0.20	526.50
3	Mercado Augusto Lema (interior)	69	450	0.36	931.50
4	Mercado Augusto Lema (patio de comidas)	36	450	0.19	486.00
5	Mercado Augusto Lema (Cubierta)	140	450	0.73	1890.00
6	Mercado Rosalino Ruiz	195	450	1.02	2632.50
7	Mercado Rosalino Ruiz (Anden)	31	450	0.16	418.50
TOTAL=		1152		6.00	15,552.00

#### 3.4.2 UBICACIÓN DE LAS INSTITUCIONES QUE NO PAGAN EL AGUA POTABLE

La asignación de caudal medio consumido autorizado y no facturado a los nudos del modelo, se hace difícil a no disponer de contadores en las instituciones que no pagan el agua y al no disponer de la información del nudo que los alimenta lo hace más difícil, para solventar esta problemática se procede de la siguiente manera.

Con ayuda de la fotografía Satelital de la ciudad de Pujilí se procede al trazado de los polígonos en la ubicación de los colegios, plazas y mercados, hospitales y las oficinas municipales, para ello se usaron las herramientas del programa ArcMap.

Inicialmente se añadió la fotografía satelital en ArcMap, para lo cual es necesario que la foto este georreferenciado y contenga el mismo sistema de proyección geográfica del área del proyecto, para poder trabajar posteriormente y visualizar lo que existe en el área de estudio (Figura 97).

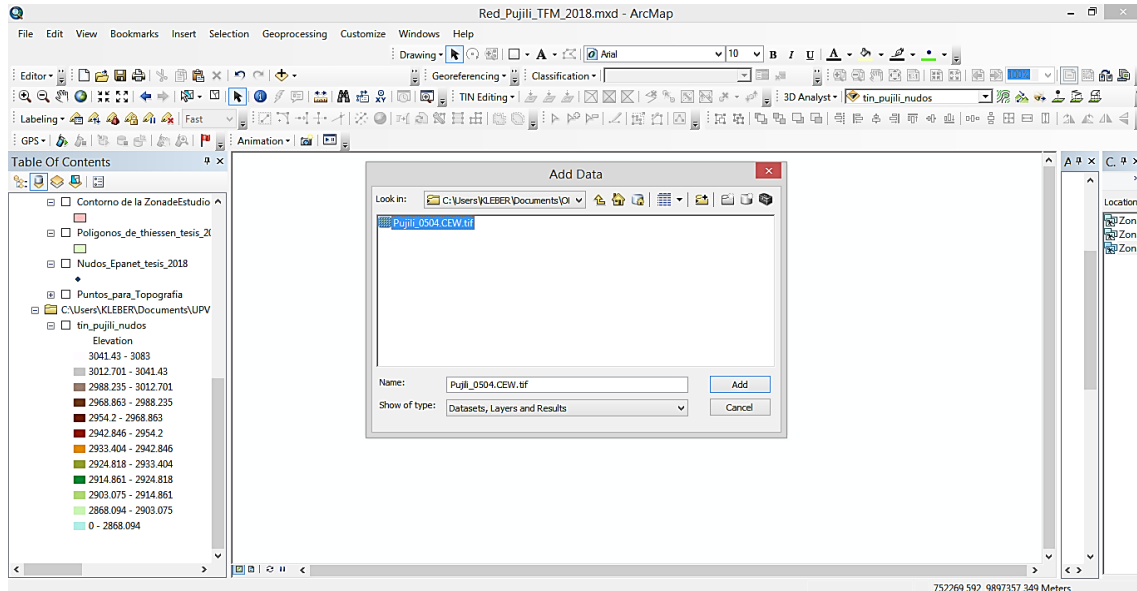


Figura 97 Abrir la fotografía satelital de la ciudad de Pujilí.

Después se procede a recorto la fotografía satelital de la ciudad con base al contorno del área del proyecto, esto es posible gracias a las herramientas del programa (Figura 98).

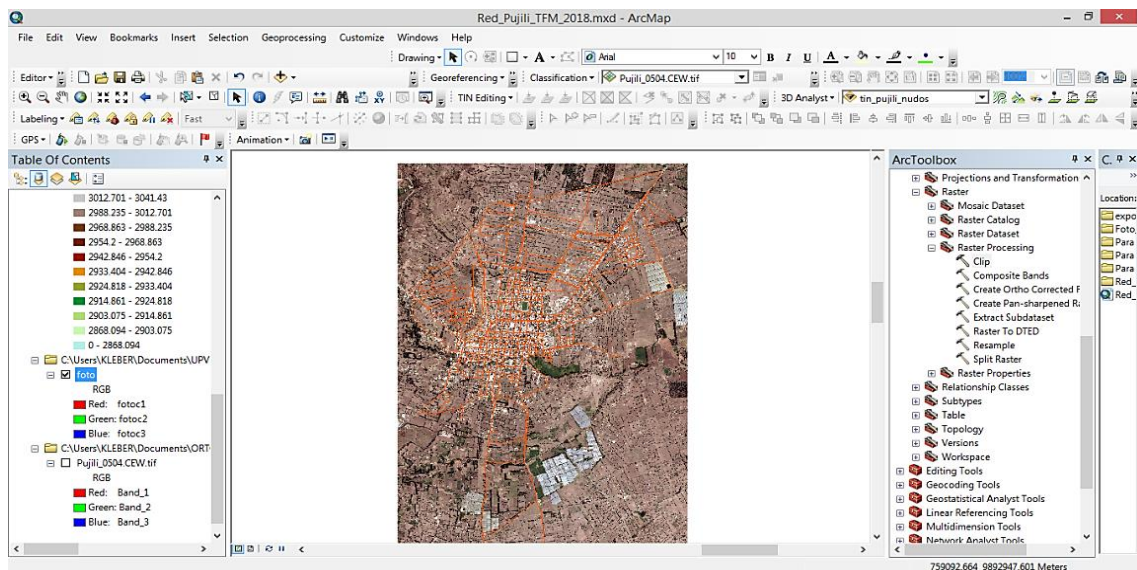


Figura 98 Recortar Fotografía satelital Pujilí.



A continuación se inserta una nueva capa .shp en el programa ArcMap, en la cual se dibujaran polígonos que representen la superficie de las instituciones que consumen agua pero no facturan. Una vez creada una nueva capa se activó el modo edición en el programa ArcMap, el mismo que permite dibujar los polígonos, y una vez finalizado la edición se guarda los cambios y se desactiva el modo edición (Figura 99).

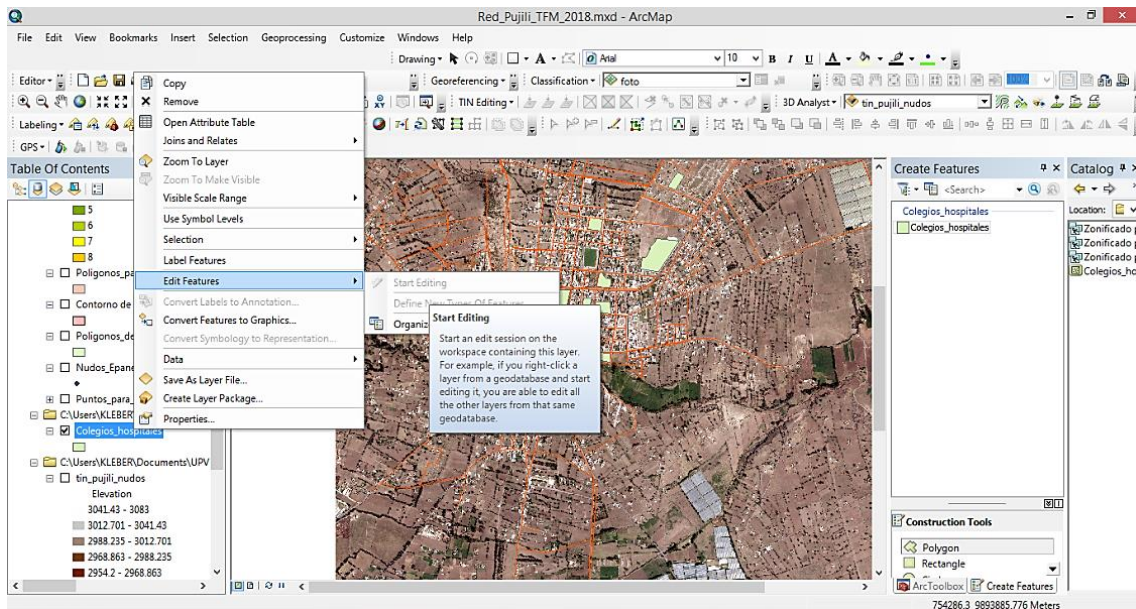


Figura 99 Dibujo de polígonos

Luego se visualiza la tabla de atributos de la capa que contiene los polígonos, y se crean nuevas columnas para colocar los identificativos de cada institución, áreas y demandas (ver Figura 100).

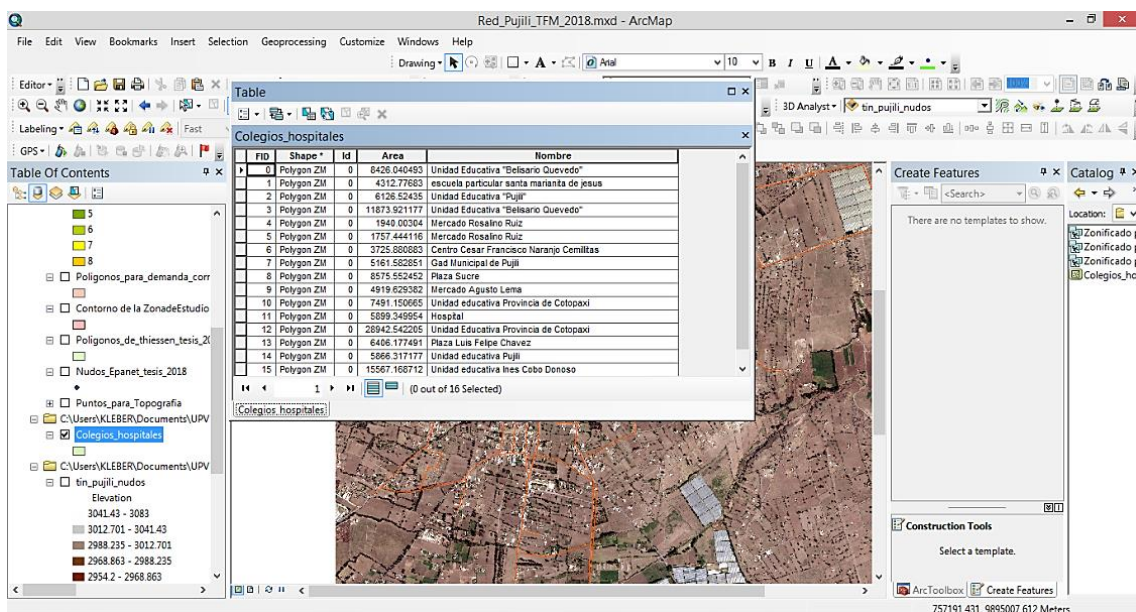


Figura 100 Edición en tabla de atributos de polígonos.

Una vez que se tiene creado las nuevas columnas se ingresa la información correspondiente a cada una, nombre de la institución, consumo medio no facturada y área del polígono, para ello se usa la información anteriormente calculada (Figura 101).

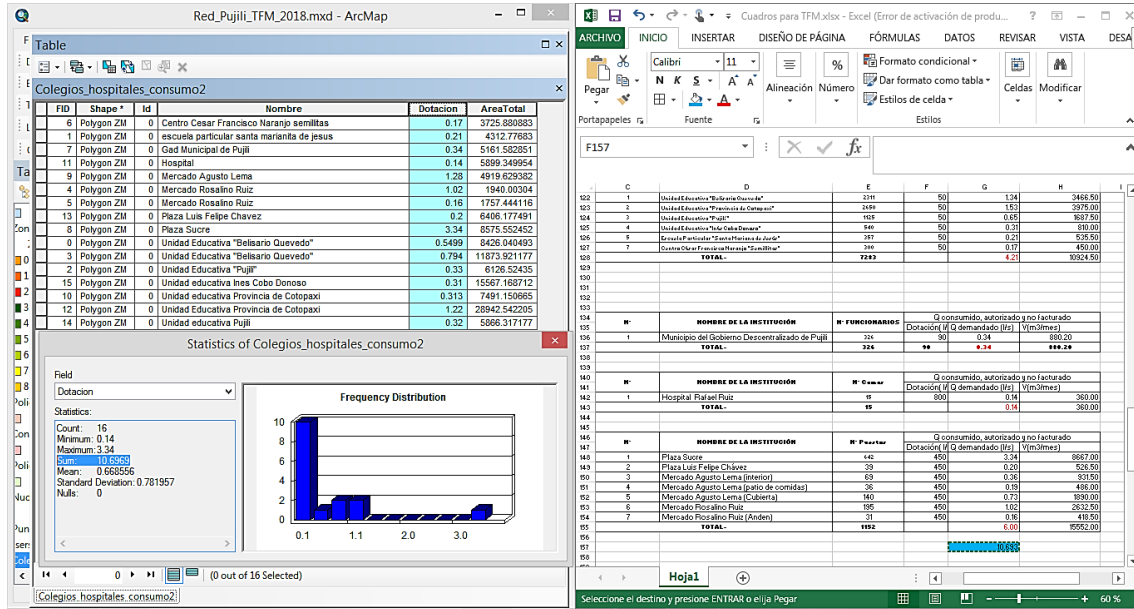


Figura 101 Consumo medio no facturado ingresadas al cuadro de atributos.

A continuación con el objetivo de identificar a qué nudo corresponde las demandas generadas por estas instituciones, se utiliza la función intersección de las herramientas de ArcMap (Figura 102).

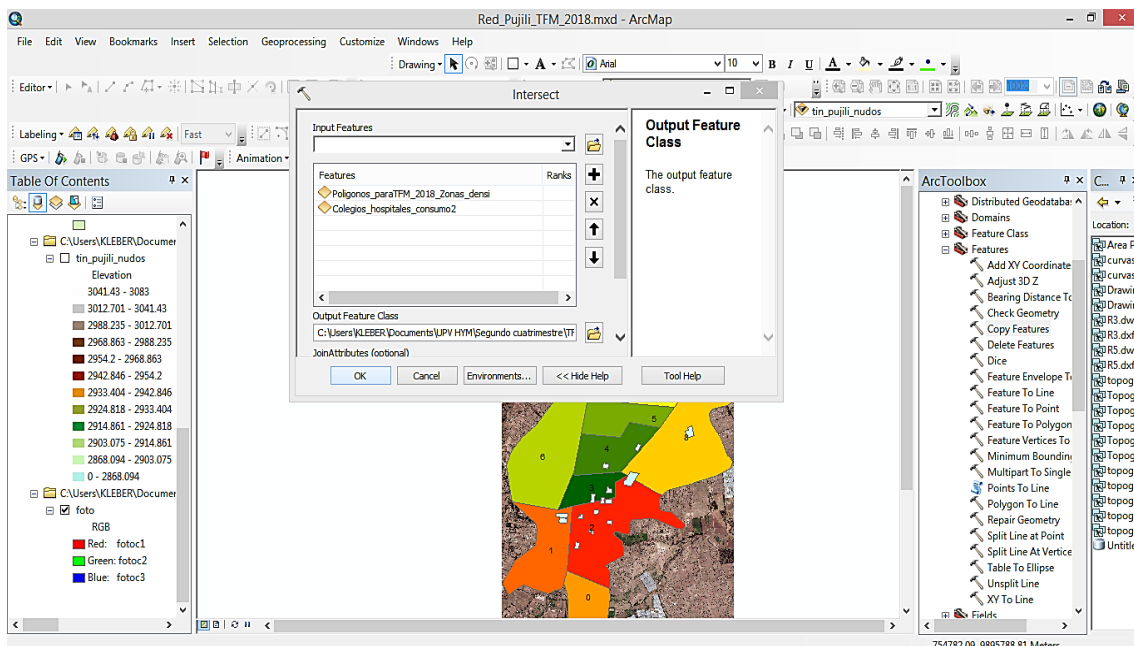


Figura 102 Intersección de áreas con polígonos.

Una vez generada la intersección entre la capa de los polígonos de las instituciones que no facturan el agua y el archivo que contiene los polígonos por densidad poblacional, se genera un nuevo archivo en el cual es necesario añadir dos nuevas columnas en la tabla de atributos, las mismas que contendrán el área parcial y caudal medio autorizado no facturado en los nudos (Figura 103).

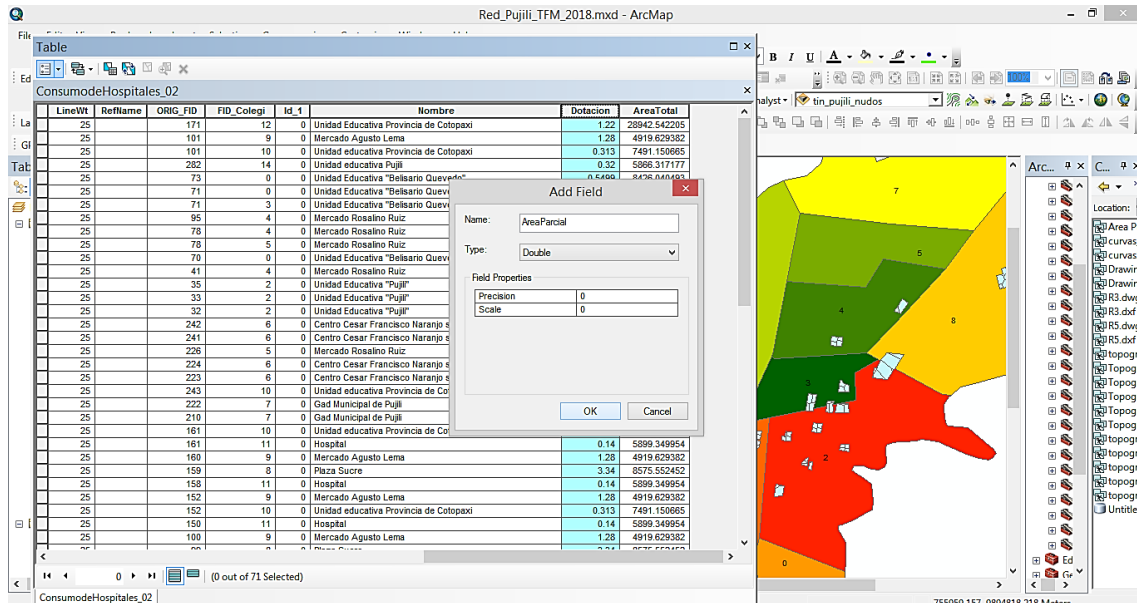


Figura 103 Creación de columnas para consumo medio no facturado.

A continuación se procede a colocar la información correspondiente a cada columna; para el cálculo del área parcial se utiliza la calculadora de la geometría de la herramienta de ArcMap como se observa en la siguiente figura.

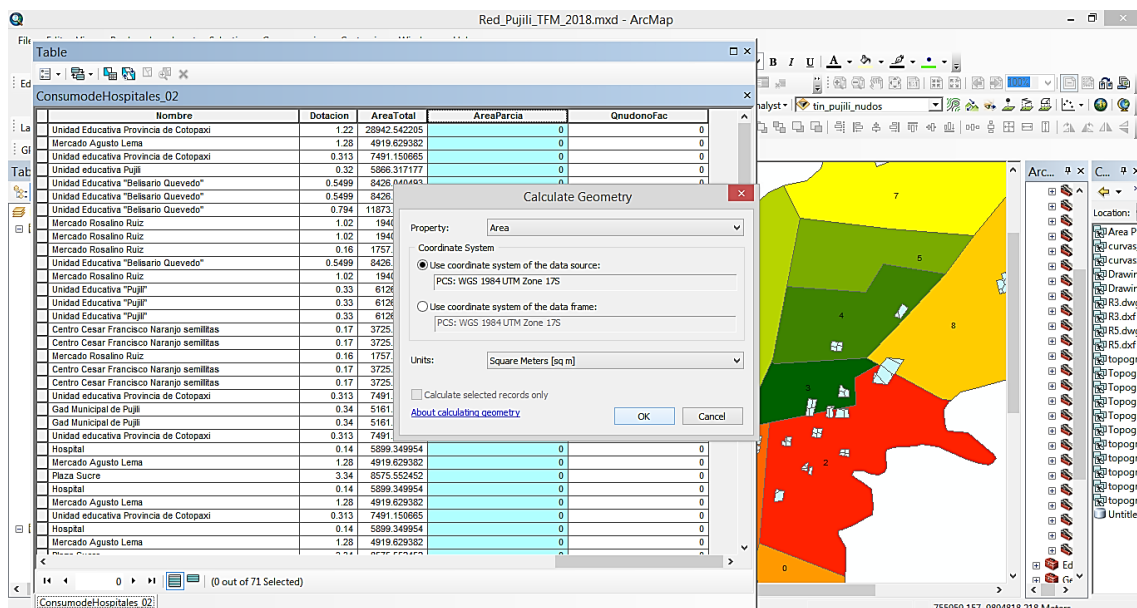


Figura 104 Cálculo de áreas.



Para el cálculo del caudal medio autorizado consumido y no facturado de cada nudo es necesario escribir la ecuación (5) en la calculadora del programa ArcMap, ya que todos los elementos que necesita mencionada ecuación se encuentran en la tabla de atributos (Figura 105).

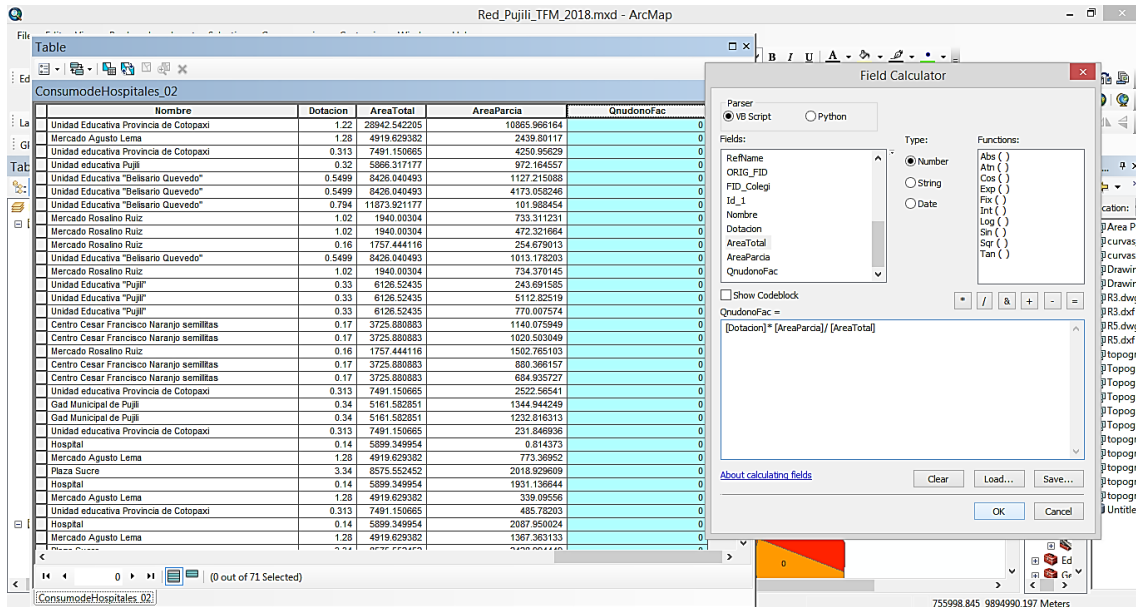


Figura 105 Cálculo de consumo medio no facturado por nudos.

Finalmente es necesario verificar que la sumatoria total del caudal medio en los nudos sean igual a la sumatoria del caudal medio autorizado consumido no facturado que es de 10.69 l/s (Figura 106).

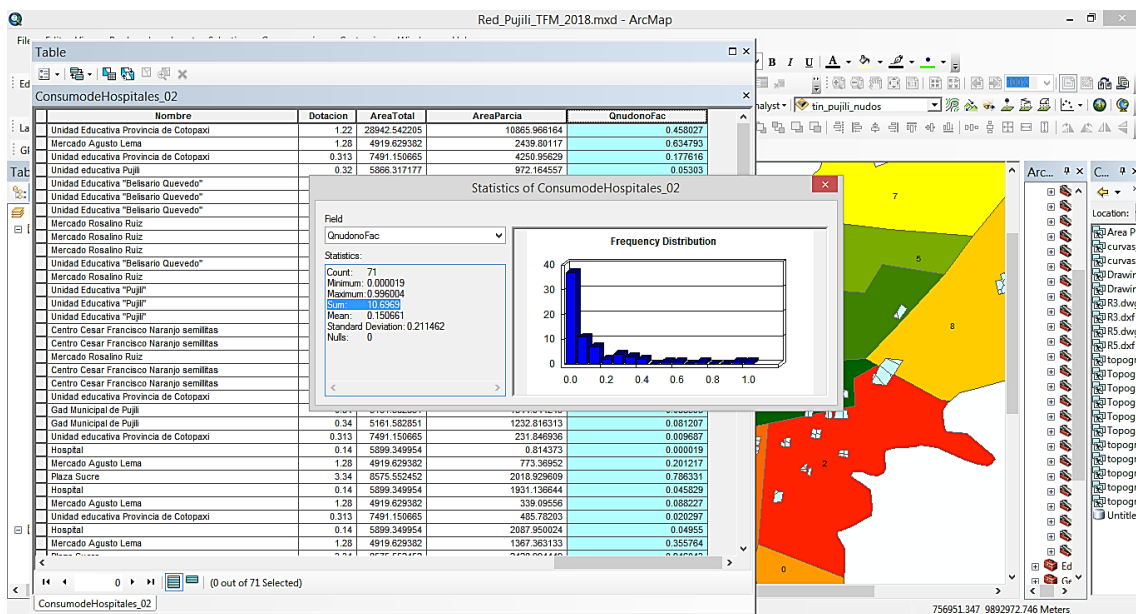


Figura 106 Comparación del consumo medio no facturado total ingresado.

### 3.4.3 ASIGNACIÓN DEL CAUDAL CONSUMIDO AUTORIZADO NO FACTURADO

Una vez identificado los nudos de consumo que alimenta a las instituciones que no pagan el agua se procede a sumar el caudal medio autorizado no facturado al nudo que corresponde, para ello se procede de la siguiente manera.

Inicialmente se exporto la tabla de atributos del ArcMap al Excel, en este punto es necesario tener en cuenta la columna que contiene la identificación de los nudos para poder relacionarlos posteriormente con la identificación de Epanet (Figura 107).

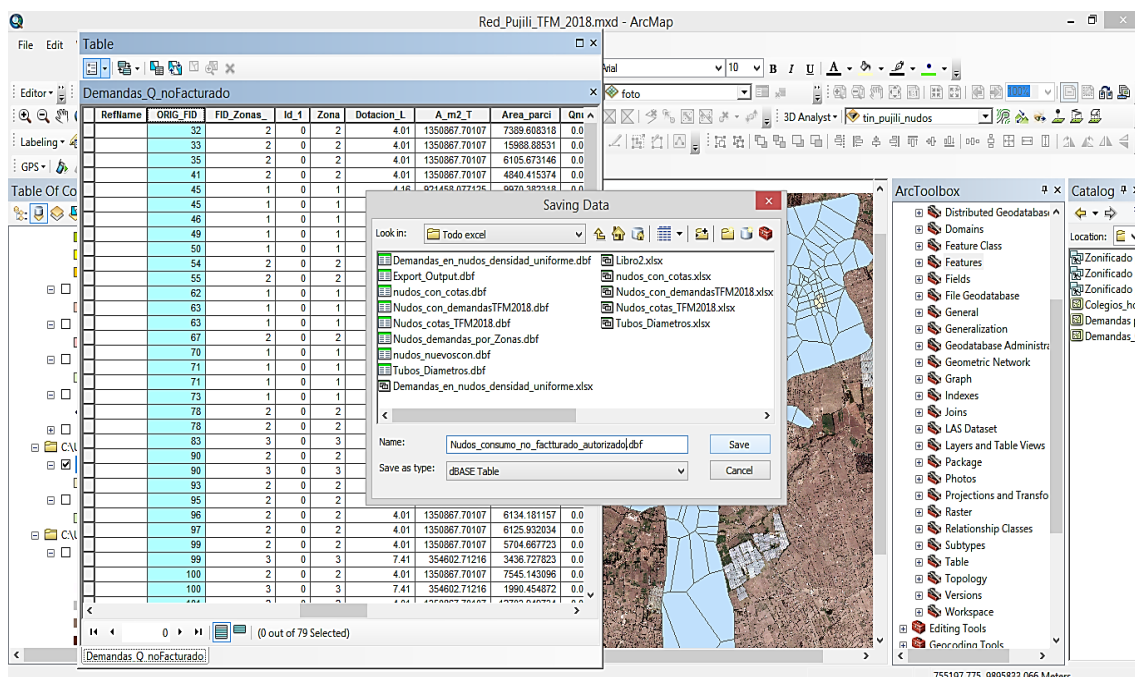


Figura 107 Exportar tablas de atributos con Q consumido no facturado.

Después se asignó el caudal medio consumido autorizado no facturado a los nudos en Excel, esto es posible gracias a que se tiene la información de la red y con ayuda de las herramientas del programa se relaciona la identificación de los nudos y se asigna el caudal medio correspondiente, también es necesario aclarar que los nudos del modelo de Epanet ya cuentan con el caudal medio consumido, autorizado facturado y se los va a sumar a los nudos que corresponda el caudal medio consumido, autorizado no facturado tal como se observa en la siguiente figura.



T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
1	ORIG_FID	QuidonoFac	sin epan	n	demanda n	Q									
2	32	0.04148	n1	1	0.15355999	0.15355999									
3	32	0.27540	n2	2	0.021590799	0.021590799									
4	35	0.01313	n3	3	0.01119401	0.01119401									
5	41	0.38611	n4	4	0.011600778	0.011600778									
6	45	0.00025	n5	5	0.01493486	0.01493486									
7	45	0.18073	n6	6	0.01566015	0.01566015									
8	46	0.14406	n7	7	0.05400189	0.05400189									
9	49	0.01219	n8	8	0.02181763	0.02181763									
10	50	0.01753	n9	9	0.0098179	0.0098179									
11	54	0.06044	n10	10	0.03834361	0.03834361									
12	55	0.02294	n11	11	0.05656619	0.05656619									
13	62	0.16145	n12	12	0.01474241	0.01474241									
14	63	0.13762	n13	13	0.03889488	0.03889488									
15	63	0.27122	n14	14	0.06041837	0.06041837									
16	67	0.06284	n15	15	0.02601725	0.02601725									
17	70	0.06612	n16	16	0.03801304	0.03801304									
18	71	0.27234	n17	17	0.09901535	0.09901535									
19	71	0.00682	n18	18	0.18015997	0.18015997									
20	73	0.07356	n19	19	0.04669915	0.04669915									
21	78	0.24833	n20	20											
22	78	0.02319	n21	21											

Figura 108 Asignación de consumo no facturado a Epanet.

Luego se verifico la información tanto del programa ArcMap como del Epanet y Excel, con el fin de ratificar la correcta asignación de los valores de caudal medio consumido autorizado y no facturado a los nudos correspondientes (Figura 109).

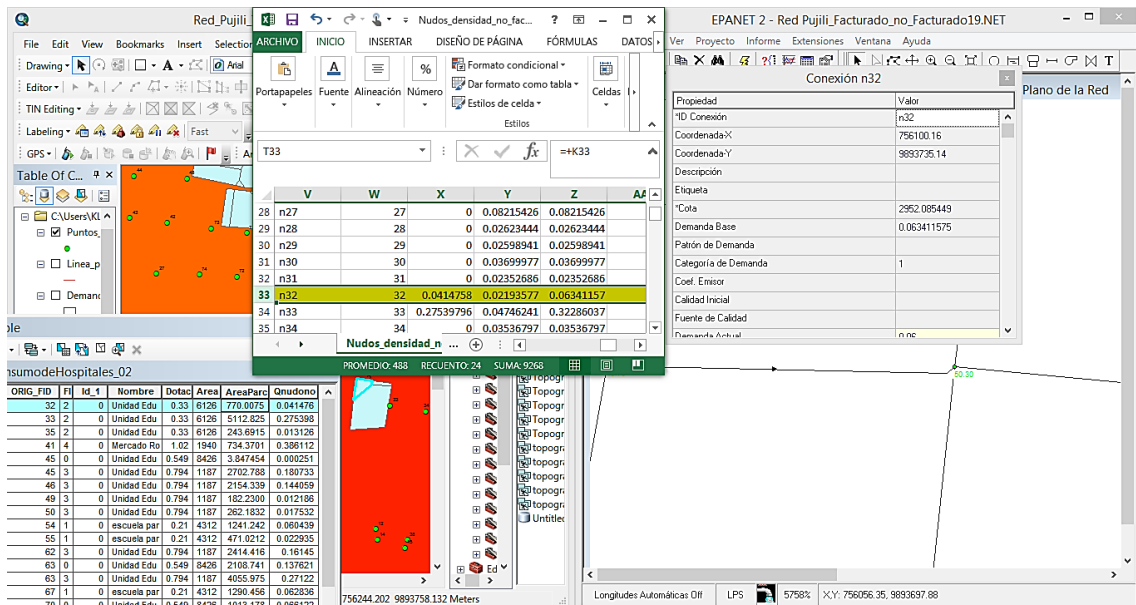


Figura 109 Comparación del consumo no facturado ingresado al Epanet con ArcMap.

A continuación se tiene un modelo en Epanet con caudales medios en los nudos tanto consumidas autorizadas facturadas y consumidas autorizadas no facturadas (Figura 110).

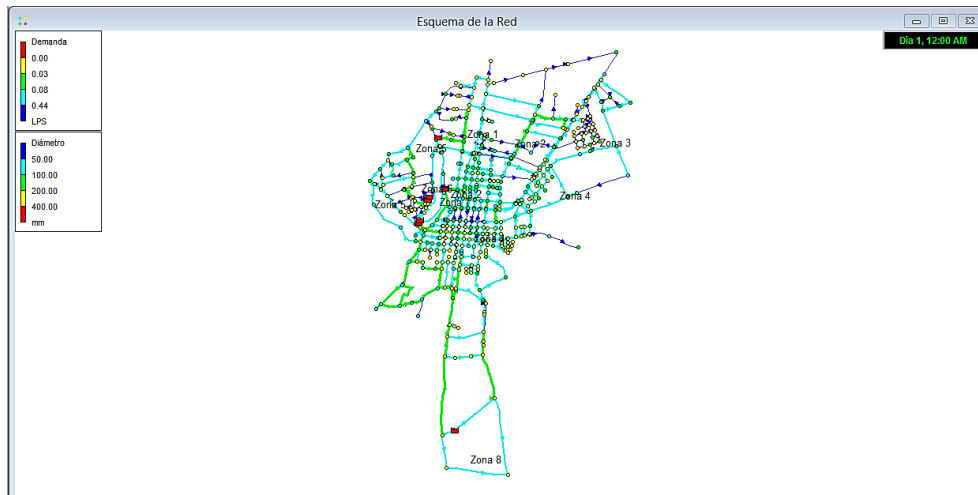


Figura 110 Modelo con Caudales consumidos facturados y no facturados.

Finalmente para realizar un análisis del comportamiento de la red a lo largo de todo el día se procede a introducir la curva de modulación horaria al modelo en Epanet (Figura 111).

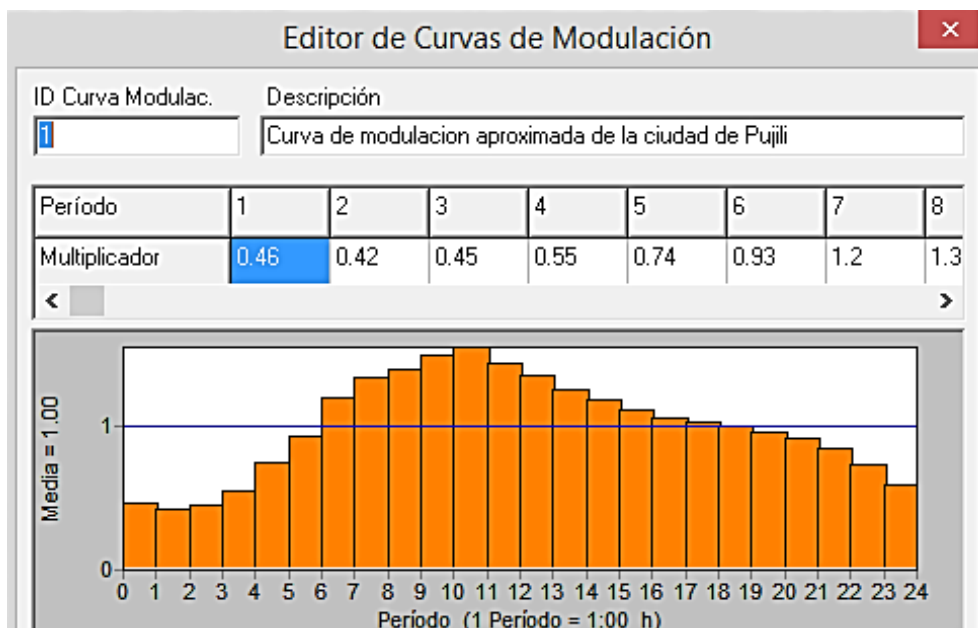


Figura 111 Curva de Modulación Horaria en Epanet.

En resumen, hasta este punto se tiene un modelo en Epanet con Q medio consumido autorizada, facturada y Q medio consumido autorizada no facturado, adicional a ello se cuenta con la curva de modulación horaria de consumo de la ciudad que permite realizar la simulación a lo largo de las 24 horas.

### 3.5 CALCULO DEL COEFICIENTE EMISOR PARA REPRESENTAR LAS FUGAS

Se detalla a continuación las etapas para la asignación del caudal fugado, para lo cual se inicia estableciendo un modelo para representar las fugas, en este caso como un caudal dependiente de la presión, posteriormente se calculara los coeficientes emisores de cada nudo para finalmente asignarlo al modelo en Epanet.

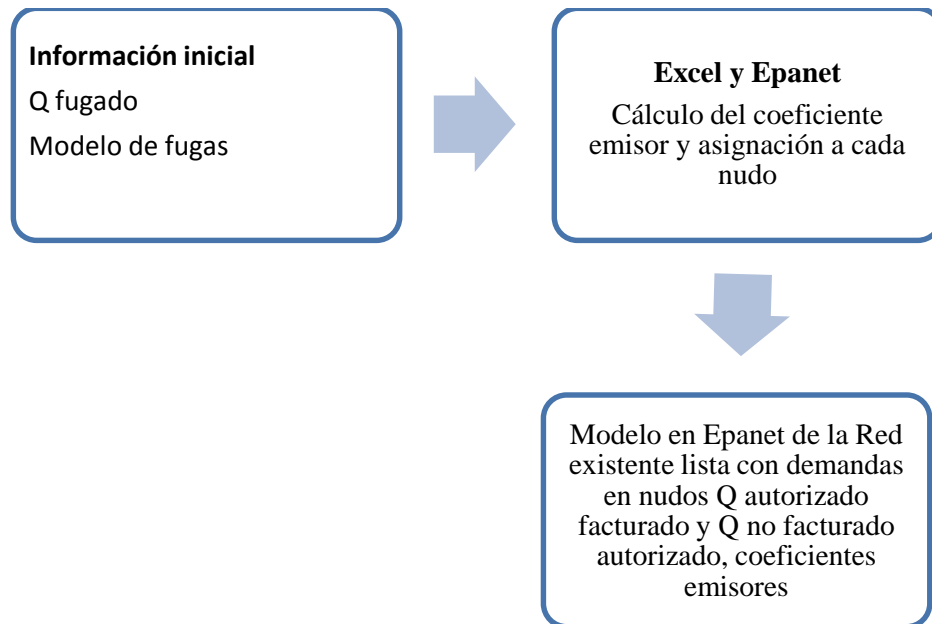


Figura 112 Etapas para el cálculo del coeficiente emisor.

#### 3.5.1 FUGAS DEPENDIENTES DE LA PRESIÓN

El presente proyecto pretende crear un modelo funcional que trate de simular el comportamiento de la red en la realidad y así la empresa (EPAPAP) pueda tomar decisiones en la gestión, es por ello que a las fugas se los representara como dependientes de la presión.

Para representar las fugas en el modelo se empleara los emisores en el programa Epanet. “Los emisores son dispositivos asociados a los nudos de caudal que permiten simular el flujo de salida a través de una tobera u orificio descargando a la atmósfera” (Lewis A, 2017). En la ecuación (6) se representa, “El caudal de salida por un emisor varía en función de la presión disponible en el nudo” (Lewis A, 2017).

$$q = C * p^{\gamma} \quad (6)$$

Donde:

q = caudal,

p= presión,

C= coeficiente de descarga,

γ= exponente de la presión.

En el proyecto se determinó el caudal fugado por lo que se utilizará la ecuación (7), en donde  $Q_{if}$  es el caudal fugado,  $K_f$  es el coeficiente emisor en el nudo que depende del tamaño del orificio,  $P$  es la presión en el nudo y  $\alpha$  es el exponente emisor.

$$Q_{if} = K_f * \sqrt{P} = K_f * P^\alpha \quad (7)$$

Para tratar las fugas, se propone el uso del coeficiente emisor global en el modelo, para representar las fugas y ajustarlo a cada nudo mediante un valor de longitud ponderada de las tuberías (LEAKAGE ASSESSMENT THROUGH WATER NETWORK, 2005) .

$$Q_F = K_f \sum_{i=1}^{N_j} L_i^- (P_i)^n \quad (8)$$

$$L_i^- = \frac{L_i}{2 * L_T} \quad (9)$$

Donde:

$Q_F$ = Caudal fugado.

$K_f$ = coeficiente global de fugas.

$L_i^-$  = factor de ponderación longitudinal nudo i.

$P_i$  = es la presión en el nudo i.

n= exponente emisor, (para el proyecto se considera un valor de 0.5)

$N_j$ = nuero total de nudos en el modelo.

$L_i$  = es el 50% de las tuberías conectadas a cada nudo.

$L_T$  = longitud total de tuberías en el modelo.

Para el cálculo del coeficiente global de fugas se utiliza la ecuación (10).

$$K_{global} = \frac{Q_{fugado}}{\sqrt{P}} \quad (10)$$

Una vez calculada el coeficiente global de fugas se procede a calcular el coeficiente de los emisores de cada nudo, para lo cual se usos la ecuación (11).

$$C\epsilon = L_i^- * K_{global} \quad (11)$$

### 3.5.2 INFORMACIÓN INICIAL

El caudal medio fugado es de 16.97 l/s, de acuerdo a la información de la empresa EPAPAP (ver Tabla 22).

Tabla 22 Datos de caudales

Datos de caudales medios de la red existente			
Q medio inyectado (a)	63.45	l/s	
Q medio consumido, autorizado y facturado (b)	35.79	l/s	
Q medio consumido, autorizado y no facturado (c)	10.69	l/s	
Q de fugas (d)= a-(b+c)	16.97	l/s	

### 3.5.3 ASIGNACIÓN DE CAUDAL FUGADO POR MEDIO DE EMISORES

Para representar el caudal medio fugado en el modelo de Epanet, se lo hace por medio de emisores para ello se inicia con exportar los datos de la red de Epanet al programa Excel, en donde con la ayuda de las ecuación (8), (9) y (10) se determina el coeficiente global de fugas (Figura 113).

	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	Coeff	NUDOS INICIAL	NUDO FINAL		L^	coeficiente											
2	0.01	355.9	267.2		0.00349852	0.00747031	0.05757189										
3	0	0	220.8		0.00123973	0.00264716	0.02040102			d=	0.5000						
4	0	159.8	135.1		0.00165578	0.00353554	0.02724755			Qfugado=	16.2185 l/s						
5	0.01	529.8	86.73		0.00346163	0.00739155	0.05696485			Pred media	59.3941 m.c.a						
6	0.01	429.44	146.2		0.00323205	0.00690132	0.05318678			Kf=	2.1353						
7	0.01	116.5	477.7		0.00333626	0.00712383	0.05490165										
8	0	59.86	157.4		0.00121873	0.00260232	0.02005546										
9	0	108.1	41.09		0.00083766	0.00178863	0.01378455										
10	0	37.22	108.1		0.00081593	0.00174223	0.01342697										
11	0	225.7	37.22		0.00147622	0.00315213	0.02429273										
12	0.01	765.6	225.7		0.00556586	0.01188465	0.09159207										
13	0	103.22	237.1		0.0019108	0.00408008	0.03144418										
14	0	86.73	411.51		0.00279747	0.00597337	0.04603534										
15	0	172.44	20.01		0.00108055	0.00230727	0.01778159										
16	0	15.78	170.54		0.00104613	0.00223378	0.01721521										
17	0	74.94	338.53		0.00232151	0.00495707	0.03820294										
18	0	148.78	231.24		0.0021337	0.00455604	0.03511229										
19	0	77.78	75.56		0.00086096	0.00183839	0.01416799										
20	0	241.53	77.78		0.00179283	0.00382819	0.02950294										
21	0	71.72	165.6		0.00133248	0.00284522	0.0219274										
22	0	74.14	71.72		0.00081896	0.00174871	0.01347687										

Figura 113 Cálculo del coeficiente emisor en Excel.



Luego con el uso de la ecuación (11), se procede a calcular el coeficiente emisor de cada nudo y con ayuda de las herramientas del Excel se procede asignar el respectivo coeficiente (Figura 114).

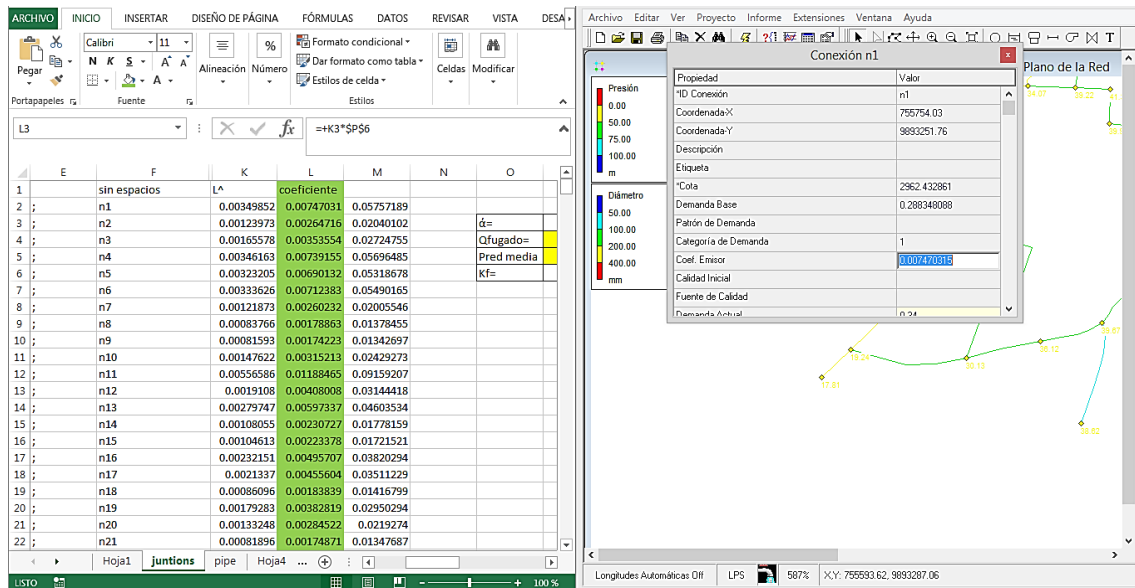


Figura 114 Ingreso del coeficiente emisor a cada nudo del Modelo de Epanet.

Finalmente se tiene el modelo con Q medio consumido, autorizado y facturado, Q medio consumido, autorizado y no facturado y Q medio de fugas como ve visualiza en la siguiente figura.

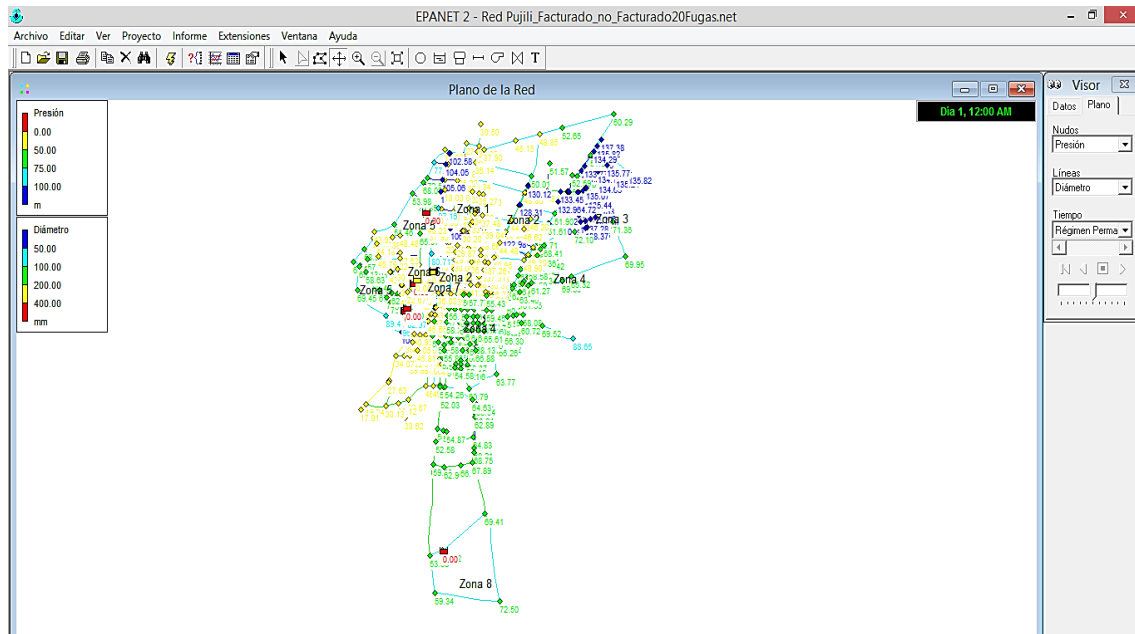


Figura 115 Modelo de red en Epanet con las demandas reportadas.

A continuación en el modelo de Epanet con los coeficientes emisores ingresados, se visualiza que el caudal medio inyectado en Epanet es diferente al registro por la empresa

EPAPAP, por lo que es necesario hacer un ajuste del coeficiente global de fugas hasta tener valores similares al caudal medio inyectado reportado por la empresa, para esto se sigue el siguiente flujograma que se detalla a continuación.

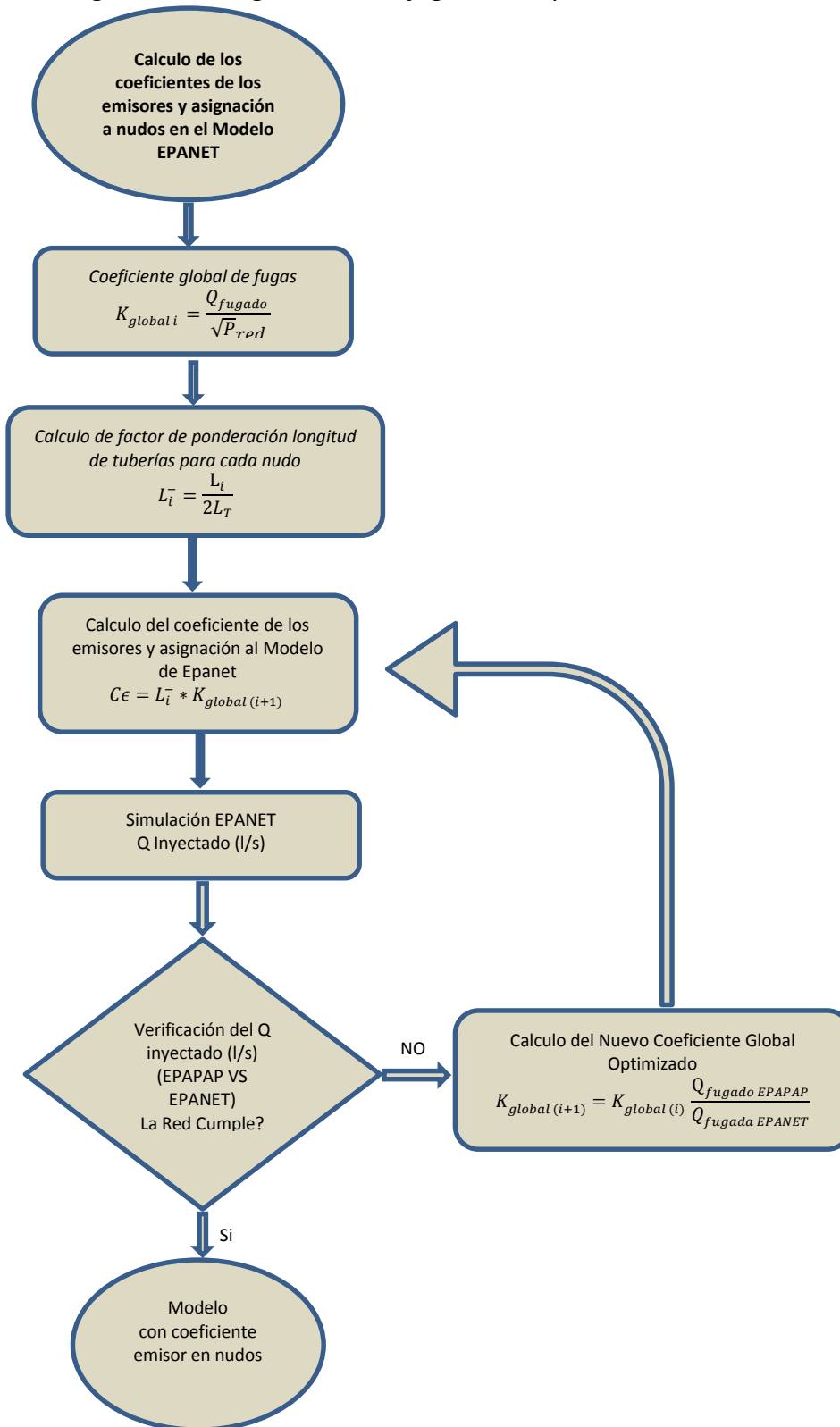


Figura 116 Flujograma del cálculo de los coeficientes emisores para el modelo

Una vez realizado las respectivas interacciones y el reporte de cada hora del día se obtuvo el valor del caudal medio inyectado en Epanet el cual es similar al valor del caudal medio inyectado reportado por la empresa tal como se visualiza en la siguiente tabla.

Tabla 23 Coeficiente global de fugas

Caudal inyectado (EPAPAP - EPANET)			
Q inyectado EPAPAP (l/s)	Q inyectado EPANET (l/s)	K coeficiente global de fugas	% Error
63.45	62.48	2.247	1.519%
63.45	63.05	2.328	0.630%
63.45	63.15	2.343	0.467%
63.45	63.43	2.384	0.021%
63.45	63.44	2.385	0.004%
63.45	63.45	2.385	0.002%

Según se puede visualizar en la Tabla 23 el coeficiente global de fugas que representa el caudal medio fugado de la red de la ciudad de Pujilí es de 2.385 representando un error de 0.002 % de acuerdo a la información del caudal medio inyectado de la empresa EPAPAP, de esta manera se obtiene un modelo que contiene por un lado el caudal medio consumido autorizado facturado, el caudal medio consumido autorizado no facturado y el caudal medio fugado, también contiene nudos de consumo con cotas, embalses, tuberías con diámetros internos, red de distribución sectorizada de acuerdo al embalse que lo alimenta, curva de modulación horaria, obteniendo así un modelo en Epanet que representa aproximadamente la situación real del sistema, también es necesario mencionar que la parte de calibración del modelo no se procedió a realizar ya que no se cuenta con datos para este propósito, por otro lado se puede realizar una simulación para de esta manera visualizar el estado actual del funcionamiento de la red, con el objetivo de identificar zonas de presiones altas, presiones bajas, sectores con pérdidas unitarias importantes así como también velocidades máximas y mínimas.

## 4. ANÁLISIS, SIMULACIONES Y RESULTADOS

### 4.1 ESTUDIO DE PRESIONES

En la red se presenta presiones máximas en los puntos bajos de la ciudad y presiones mínimas en los puntos más elevados, así mismo las presiones máximas están alrededor de 100 mca, las cuales pueden causar fisuras en la red así como favorecer el incremento del volumen fugado. Las presiones mínimas se sitúan alrededor de 10.43 mca en zonas cercanas a los embalses de alimentación tal como se muestra en la Figura 117, también es importante aclarar que las presiones máximas se dan a la 1 am donde se registra el menor consumo de acuerdo a la curva de modulación horario y las presiones mínimas se dan a las 10 de la mañana donde el consumo es el máximo (ver Figura 10).

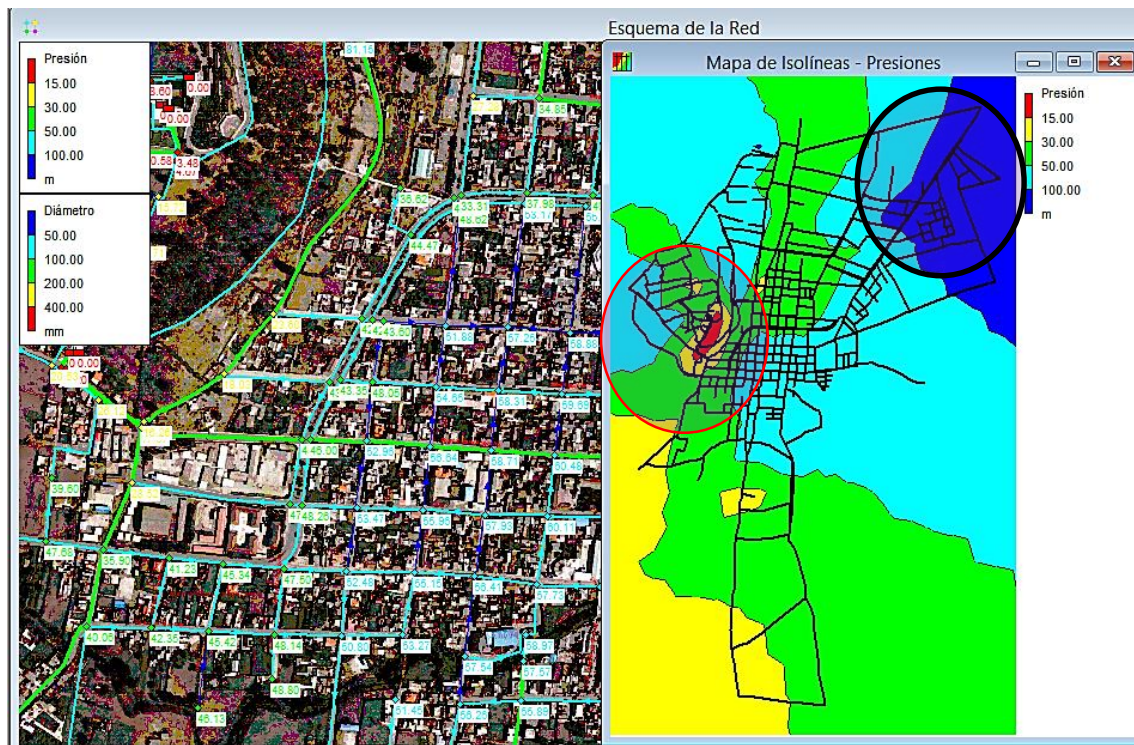


Figura 117 Presiones máximas y mínimas.

### 4.2 ESTUDIO DE VELOCIDADES

Las velocidades mínimas en una red de abastecimiento de agua potable afecta a la calidad del agua entregada al usuario, así como las velocidades máximas ocasionan desgaste de las paredes de las tuberías debido a la fricción, adicional a ello generan importantes pérdidas de carga.



#### 4.2.1 VELOCIDAD MÍNIMA

Las velocidades mínimas se dan en hora de menor consumo en este caso a la 1 am, también es ocasionado por tuberías sobre dimensionadas esto a su vez conlleva a tener problemas de calidad del agua dentro de la red, en algunas zonas y ramales alejados sin mucha demanda en horas valle se registran velocidades menores a 0.1 m/s tal como se visualiza en Figura 118.



Figura 118 Velocidades mínimas en la red.

#### 4.2.2 VELOCIDAD MÁXIMA

Las velocidades máximas se producen en hora punta a las 10 am, así como en tramos donde las tuberías están subdimensionadas, dichas velocidades están presentes en las tuberías que transportan más caudal tal como se muestra en Figura 119, la tubería p45 registra la máxima velocidad del sistema que es de 1.55 m/s en hora punta.



Figura 119 Velocidades máximas en la red.



### 4.3 ESTUDIO DE CAUDALES

Es importante identificar las tuberías que están transportando el mayor porcentaje del caudal medio inyectado, esto permite identificar que tubería esta sobrecargada, durante el análisis de la red existente en el modelo de Epanet, por otro lado se identificó que las líneas más cargadas son las de mayor diámetro, constituyéndose los ramales principales los mismos que se visualiza en la Figura 120, la tubería que transporta el mayor caudal es la p46 de diámetro interior 180.8 mm la misma que alimenta desde el embalse R48 a la zona 4.

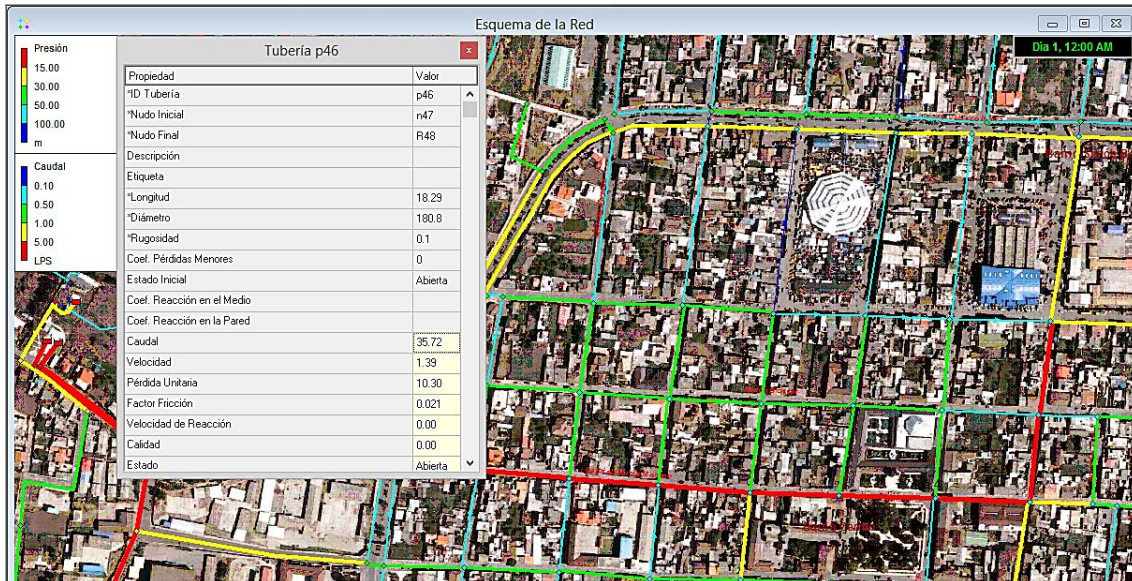


Figura 120 Caudales en tuberías.

La variación del caudal en la línea p529 obedece a la curva de modulación horaria a lo largo de todo el día, se puede visualizar en la Figura 121.

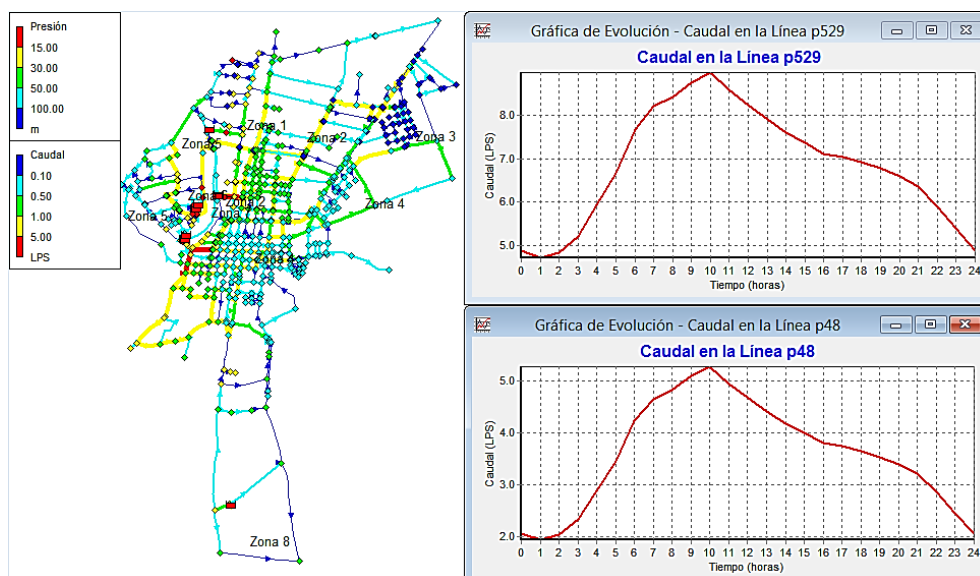


Figura 121 Evolución de los caudales en la tubería durante las 24 horas.

#### 4.4 ANÁLISIS DE PÉRDIDAS UNITARIAS

Este análisis se lo realiza con el objeto de identificar aquellas tuberías que actúan como cuello de botella disipado energía, también permite identificar tramos de red con diámetros subdimensionados.

Las pérdidas unitarias registradas en la red están en su mayoría comprendidas entre 0.01 m/km hasta 12 m/km, sin embargo existen ciertas tuberías que reportan perdidas unitarias entre el rango de 15 a 20 m/km tal como se visualiza en la Figura 122, así mismo existe un tramo de tubería que reporta la mayor pérdida unitaria, tubería p328 de diámetro interior de 29 mm y de longitud 100 m con una velocidad 0.59 m/s y un caudal máximo de transporte de 0.39 l/s.

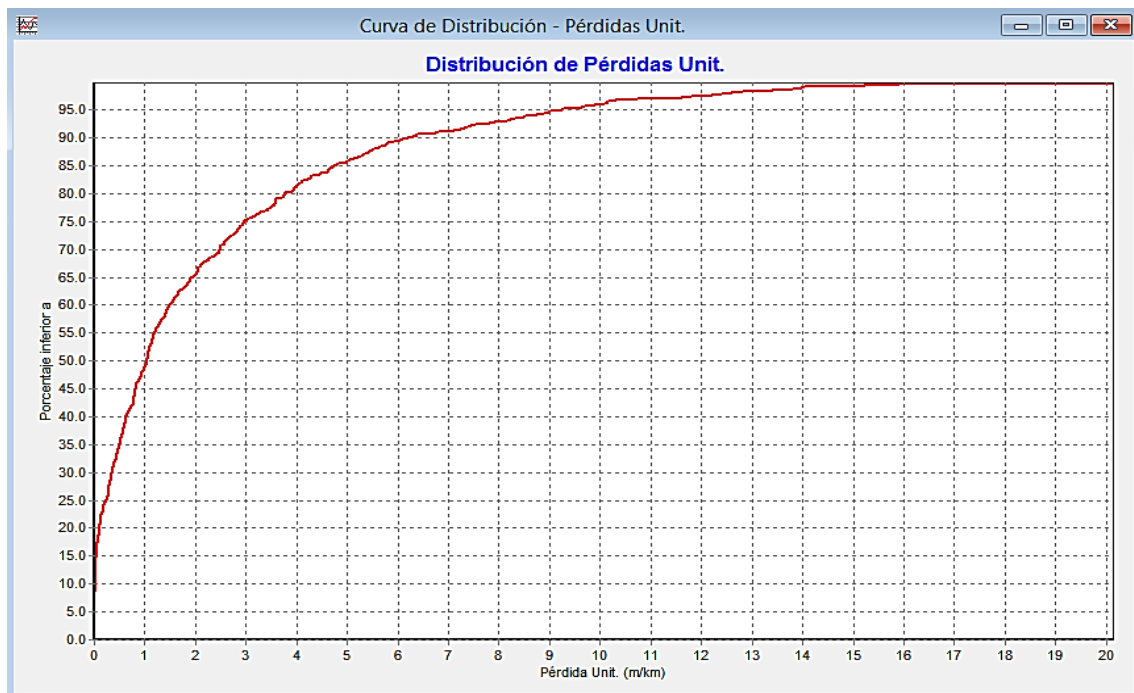


Figura 122 Perdida unitaria mca/km.

#### 4.5 DIAGNÓSTICO DE LA RED EXISTENTE DE ACUERDO AL MODELO EN EPANET

El diagnóstico de una red es importante ya que nos permite determinar el estado actual identificando posibles falencias y ayuda a mejorar la gestión de la red. Con respecto al diagnóstico del estado actual de la red de la ciudad de Pujilí, se tomó como datos aproximados los otorgados por la empresa EPAPAP, los mismos que fueron muy escasos y teniendo en cuenta que el presente trabajo es netamente académico se consideró los mismos para la posterior evaluación.

#### 4.5.1 EVOLUCIÓN DE LOS CAUDALES A LO LARGO DE LAS 24 HORAS

Como punto de partida se tiene el modelo matemático en Epanet, el mismo que cuenta con la curva de modulación horaria, los coeficientes emisores para representar las fugas, los diámetros internos de los diferentes ramales de la red, demandas registradas y no registradas en cada nudo de consumo, con todo lo anteriormente detallado se obtuvo los siguientes resultados (Tabla 24).

Tabla 24 Evolución de caudales en las 24 horas.

Hora	C= Q Inyectado (l/s)	Patrón (CM)	A= Q facturado (l/s)	B= Q consumido no facturado (l/s)	D= Q consumido = A+B (l/s)	Q fugada =C-D (l/s)
1	36.82	0.42	15.03	4.49	19.52	17.30
2	38.2	0.45	16.11	4.81	20.92	17.28
3	42.81	0.55	19.68	5.88	25.57	17.24
4	51.52	0.74	26.48	7.91	34.40	17.12
5	60.25	0.93	33.28	9.94	43.23	17.02
6	72.62	1.20	42.95	12.83	55.78	16.84
7	79.01	1.34	47.96	14.33	62.29	16.72
8	81.77	1.40	50.11	14.97	65.08	16.69
9	85.88	1.49	53.33	15.93	69.26	16.62
10	88.6	1.55	55.47	16.57	72.05	16.55
11	83.59	1.44	51.54	15.40	66.94	16.65
12	79.48	1.35	48.32	14.44	62.75	16.73
13	75.37	1.26	45.10	13.47	58.57	16.80
14	71.71	1.18	42.23	12.62	54.85	16.86
15	68.95	1.12	40.08	11.98	52.06	16.89
16	65.73	1.05	37.58	11.23	48.81	16.92
17	64.82	1.03	36.86	11.01	47.88	16.94
18	63.47	1.00	35.79	10.69	46.48	16.99
19	61.61	0.96	34.36	10.27	44.62	16.99
20	59.33	0.91	32.57	9.73	42.30	17.03
21	56.58	0.85	30.42	9.09	39.51	17.07
22	51.07	0.73	26.13	7.81	33.93	17.14
23	44.86	0.60	21.29	6.36	27.66	17.20
24	38.65	0.46	16.46	4.92	21.38	17.27
<b>Promedio</b>	<b>63.45</b>	<b>1.00</b>	<b>35.79</b>	<b>10.70</b>	<b>46.49</b>	<b>16.96</b>

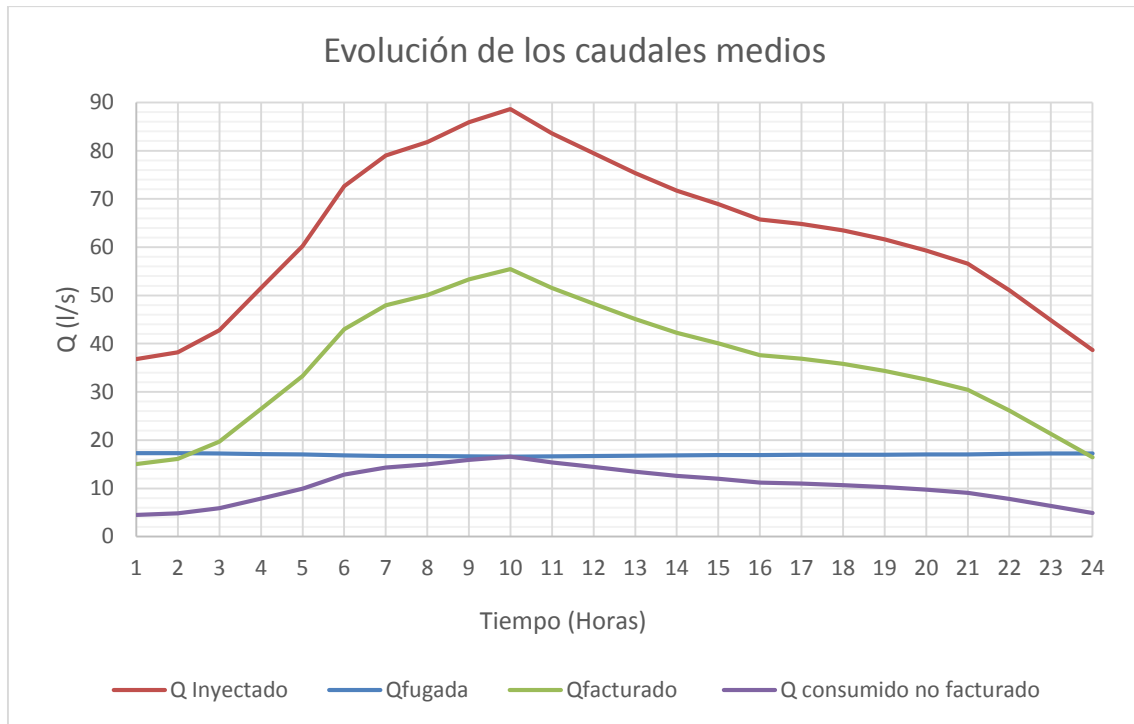


Figura 123 Curvas de evolución de caudales en las 24 horas.

#### 4.5.2 EVALUACIÓN DE LOS COSTES DEL AGUA

Para determinar el coste del volumen de agua inyectada, consumida no facturada y el volumen de agua fugada se ha considerado un precio del agua de 0.41 \$/m<sup>3</sup> (este precio está en dólares). Estos datos han sido aportados por la empresa EPAPAP, como se detalla en la Tabla 25.

Tabla 25 Volumen y coste de agua inyectada a la red existente.

Volumen Inyectado		Coste del Volumen Inyectado	
Vm <sup>3</sup> /día=	5,481.7	\$/día=	2,235.60
Vm <sup>3</sup> /mes=	164,451.6	\$/mes=	67,067.86
Vm <sup>3</sup> /año=	1,973,419.2	\$/año=	804,814.33
<b>Volumen autorizado facturado</b>		<b>Coste del Volumen autorizado facturado</b>	
V m <sup>3</sup> /día=	3,092.9	\$/día=	1,261.36
V m <sup>3</sup> /mes=	92,786.3	\$/mes=	37,840.80
V m <sup>3</sup> /año=	1,113,435.9	\$/año=	454,089.62
<b>Volumen autorizado no facturado</b>		<b>Coste del Volumen autorizado no facturado</b>	
V m <sup>3</sup> /día=	924.1	\$/día=	376.87
V m <sup>3</sup> /mes=	27,722.5	\$/mes=	11,305.98
V m <sup>3</sup> /año=	332,669.7	\$/año=	135,671.80



Volumen Fugado		Coste del Volumen Fugado	
V m <sup>3</sup> /día=	1,464.8	\$/día=	597.37
V m <sup>3</sup> /mes=	43,942.8	\$/mes	17,921.08
V m <sup>3</sup> /año=	527,313.6	\$/año=	215,052.91

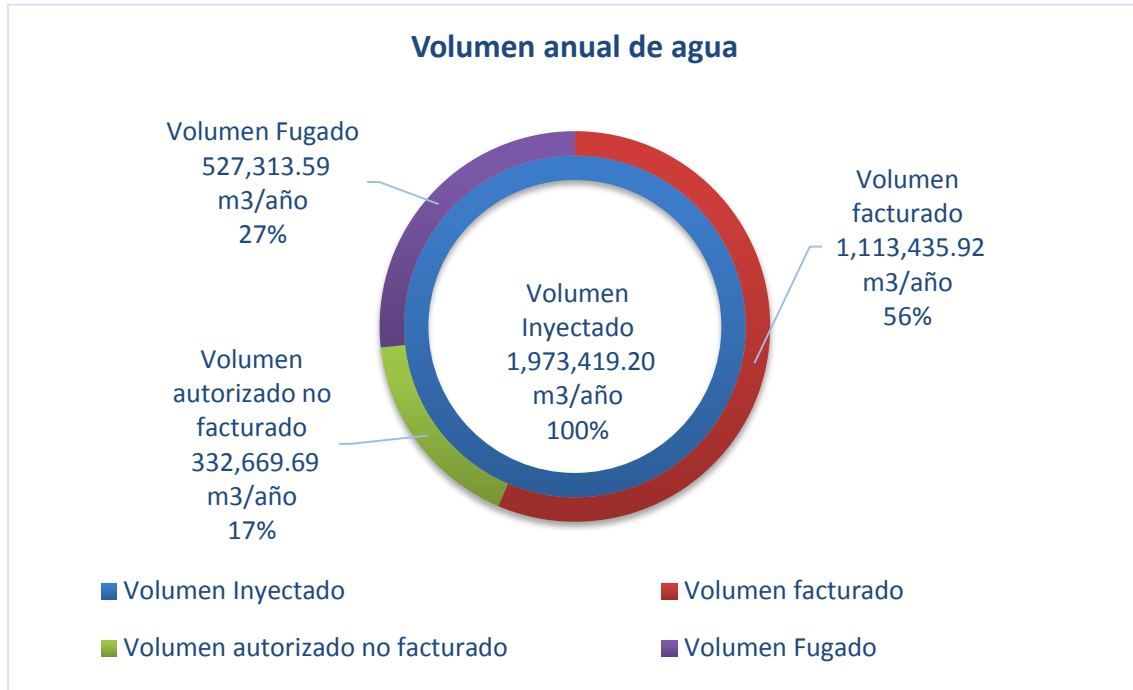


Figura 124 Volumen anual de agua en la red.

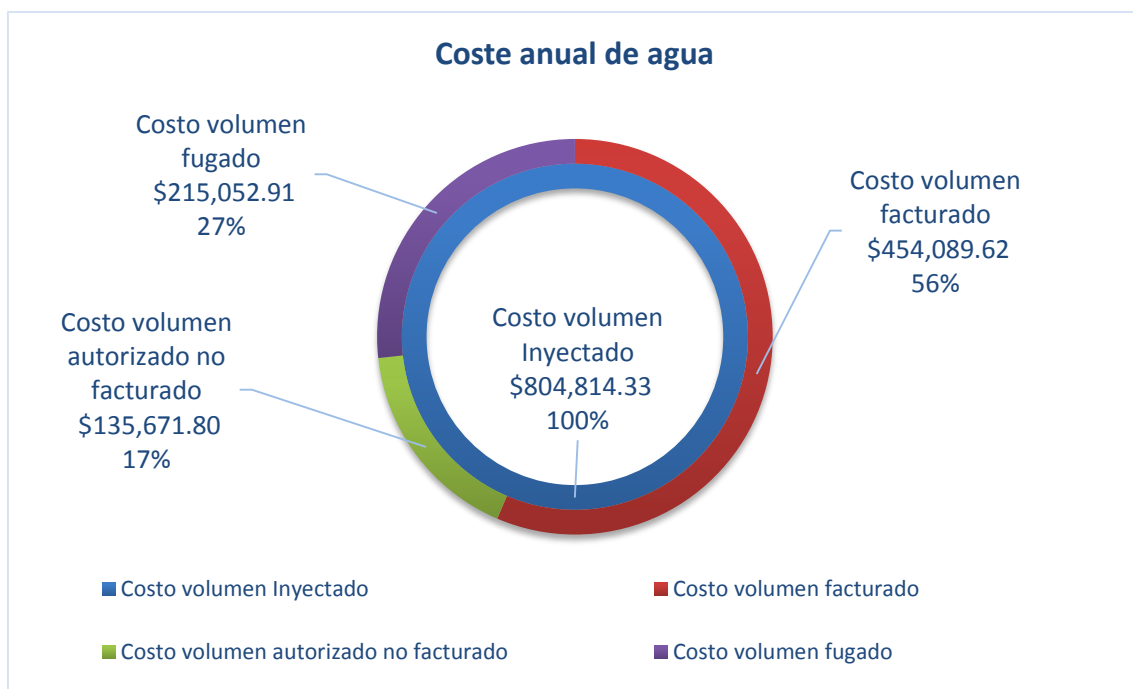


Figura 125 Coste anual del volumen de agua en la red.

El volumen anual de agua consumida autorizada no facturada representa el 17 % del total inyectado así como su coste en el año, por otro lado el volumen anual del agua incontrolada fugada representa el 27 % así como su coste (Figura 125).

#### 4.5.3 BALANCE HÍDRICO TÉCNICO DE LA RED

El propósito principal de realizar el balance hídrico técnico de la red existente es conocer los distintos rendimientos volumétricos así como también la valoración de acuerdo a mencionados rendimientos, esto permitirá saber en dónde podemos mejorar.

Tabla 26 Datos para balance hídrico técnico.

Datos de la Red de la Ciudad de Pujilí para balance Hídrico Técnico		
<b>V(Volumen inyectado)</b>	1,973,419.2	m <sup>3</sup> /año
<b>Vi (Volumen incontrolado)</b>	859,983.3	m <sup>3</sup> /año
<b>Vr (Volumen Registrado)</b>	1,113,435.9	m <sup>3</sup> /año
<b>Vic (Volumen incontrolado consumido)</b>	332,669.7	m <sup>3</sup> /año
<b>Vif (Volumen incontrolado fugado)</b>	527,313.6	m <sup>3</sup> /año

Tabla 27 Rendimiento volumétrico de la red.

Rendimientos Volumétricos	
<b>Rendimiento global del sistema <math>n_g=Vr/V</math></b>	56.4%
<b>Rendimiento de la red <math>n_r=Vs/V</math></b>	73.3%
<b>Rendimiento de la medición <math>n_m=Vr/Vs</math></b>	77.0%

Tabla 28 Valoración según rendimiento global.

Rendimiento Volumétrico. Valoración	
Rango	calificación
$n_g \geq 0.90$	Excelente
$0.80 \leq n_g < 0.90$	Bueno
$0.70 \leq n_g < 0.80$	Regular
$0.60 \leq n_g < 0.70$	Malo
$0.50 \leq n_g < 0.6$	<b>Inaceptable</b>
$0.5 < n_g$	Inadmisible

El rendimiento global de la red existente de agua potable de la ciudad de Pujilí de acuerdo al balance hídrico técnico es de 56.4% (ver Tabla 27), mismo que se encuentra

en la calificación inaceptable de acuerdo a la valoración (ver Tabla 28), cabe señalar que este balance se lo realizó con valores promedios y datos aproximados ya que al momento del desarrollo de este trabajo no se cuenta con más información.

#### 4.5.4 EL BALANCE HÍDRICO DE LA IWA (RED DE LA CIUDAD DE PUJILÍ)

El balance de la IWA no sigue criterios de la medición universal, considera que el mayor porcentaje de las pérdidas en el sistema se sitúa en las acometidas, para representar este balance es necesario calcular algunos índices como se muestra a continuación.

Umbral mínimo de fugas (UMF): trata de contemplar los niveles mínimos de fugas que es posible alcanzar con las condiciones tecnológicas y económicas actuales.

$$UMF = \frac{(A * L_t + B * N_a + C * L_a) * p}{N_a} \quad (12)$$

Donde:

$L_t$ : Longitud total de las tuberías de distribución de la red en (Km)

$N_a$ : número total de acometidas existentes

$L_a$ : suma de las longitudes de todas las acometidas en (Km)

P: presión media del sistema en (mca)

A, B y C: constantes que ponderan de la influencia del parámetro que acompañan.

“Las constantes toman los siguientes valores  $A= 18$ ,  $B=0.8$  y  $C= 25$  estos valores se calcularon a partir del análisis estadístico de datos procedentes de 27 abastecimientos ubicados en 20 países diferentes” (Una aproximación a la problemática de las pérdidas de agua en redes urbanas, 2005).

El Volumen Incontrolado Fugado (VIF)

Este parámetro relaciona el número de acometidas ya que es el lugar donde se presentan el mayor porcentaje de las pérdidas reales del sistema existente de agua las unidades de este indicador son litros / acometidas y día.

$$VIF = \frac{Q_{if}}{N^{\circ} \text{ acometidas}} = \frac{V_{if}}{(dia)(N^{\circ} \text{ acometidas})} \quad (13)$$

Índice de fugas estructural (IFE), incluye todos los factores de riesgo (longitud de las acometidas, longitud de la red, presión, número de acometidas).

$$IFE = \frac{VIF}{UMF} \quad (14)$$

Tabla 29 Datos para balance hídrico de la IWA.

Datos de la Red de la Ciudad de Pujilí para balance Hídrico de la IWA		
Volumen consumido autorizado y facturado	1,113,435.9	m <sup>3</sup> /año
Volumen consumido autorizado y no facturado	332,669.7	m <sup>3</sup> /año
N° de acometidas existentes en el sistema	5,875.0	
Longitud media de las acometidas	11.0	m
Longitud total de la red de distribución	89.1	km
Presión media del sistema	54.9	mca

Tabla 30 Resultados del balance hídrico de la IWA.

Resumen de volúmenes fugados		
Fugas por unidad de tiempo	527,313.6	m <sup>3</sup> /año
	1,444.7	m <sup>3</sup> /día
	60.2	m <sup>3</sup> /h
Fugas por unidad d longitud de la red y tiempo	5,920.8	m <sup>3</sup> /Km*año
	16.2	m <sup>3</sup> /Km*día
	0.7	m <sup>3</sup> /Km*h
VIF= Fugas por unidad de tiempo y acometida:	89.8	m <sup>3</sup> /año* acom
	0.2	m <sup>3</sup> /día* acom
	0.01	m <sup>3</sup> /hora* acom
VIF=	245.9	l/día*acom
Umbral mínimo de fugas		
UMF=	74.03	L/día*acom
	434,896.98	L/día
	5.03	l/s
Índice de Fugas Estructurales		
IFE=	VIF/UMF	3.32

De acuerdo al balance de la IWA se tiene un índice de fugas de 3.32 y umbral mínimo de fugas de 5.03 l/s tal como se observa en (Tabla 30).



## 5. PROPUESTA DE MEJORAS

### Gestión de la presión

Una vez analizado el modelo de la red en Epanet, se visualiza que en algunos sectores posee presiones elevadas que superan los 100 mca, esto a su vez provoca un incremento del agua incontrollada fugada, es por esta razón muy importante la sectorización y posterior colocación de válvulas reductoras de presión para bajar el % de agua fugada. Para lograr esto se procede de la siguiente manera.

- Identificación de las zonas con altas presiones.
- Sectorizar los nudos con altas presiones, para ello se utilizó el modo de tubería cerrada en el modelo de Epanet.
- Colocación de válvulas reductoras de presión.
- Evaluación del rendimiento del sistema después de gestionar la presiones.

#### 5.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS CON ALTAS PRESIONES

Como punto de partida se tiene la información del modelo en Epanet, donde se solicita el reporte de máximos identificando así los nudos con presiones altas durante las 24 horas, hay que tomar en cuenta que en las horas de menor consumo se incrementa las presiones y por tanto el caudal medio fugado es mayor, para ilustrar de mejor manera se pide el reporte en un mapa de Isolíneas de presiones tal como se muestra a continuación.

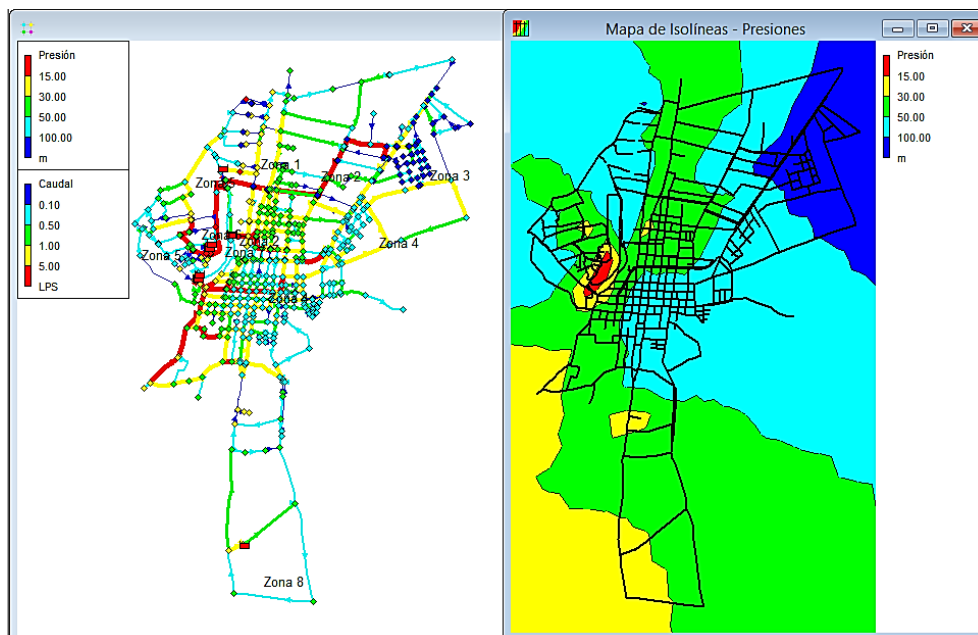


Figura 126 Mapa de Isolíneas presiones máximas en red ciudad de Pujilí.

## 5.2 SECTORIZAR LOS NUDOS CON ALTAS PRESIONES

El propósito principal de sectorizar es tener controlado del suministro de agua a los nudos con presiones altas, para ello se considera la misma zonificación por embalse de alimentación (ver Tabla 12), pero se aísla los nudos dejando una sola línea de alimentación de agua, esto es posible gracias a que se cuenta con válvulas de seccionamiento en cada ramal información de la EPAPAP, y la función de cierre de estos elementos se representa en Epanet con tubería estado inicial cerrada como se visualiza en (Figura 127).

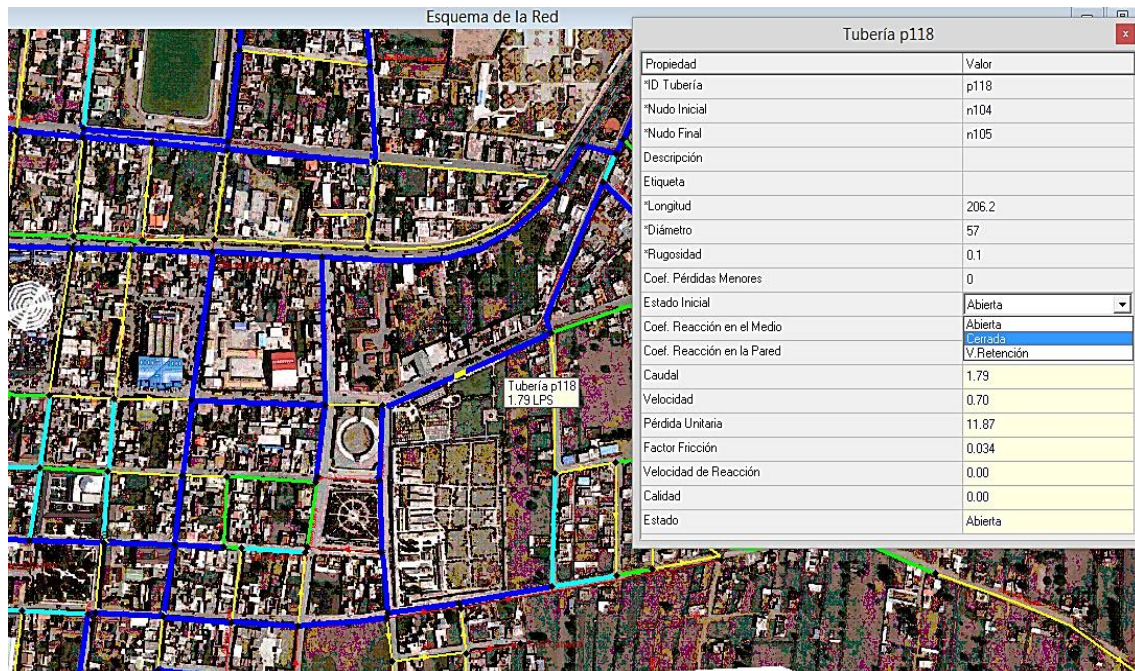


Figura 127 Estado inicial de tubería Cerrada (zonificación).

## 5.3 COLOCACIÓN DE VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN

El objetivo principal de la colocación de válvulas reductoras de presión es garantizar aguas abajo una presión constante a lo largo del día independientemente de la fluctuación horaria de caudales y presión, hay que tomar en cuenta que el sistema funciona a gravedad por ello se presentan presiones altas en los puntos de menor cota en la red. Para la colocación de las válvulas reductoras de presión en el modelo basta con elegir en el programa Epanet añadir válvula y seleccionar el tipo de válvula que se necesita en este caso reductora, también tenemos que introducir la consigna la misma que será determinado de acuerdo a las presiones mínimas del sistema tal como se observa en la (Figura 128).

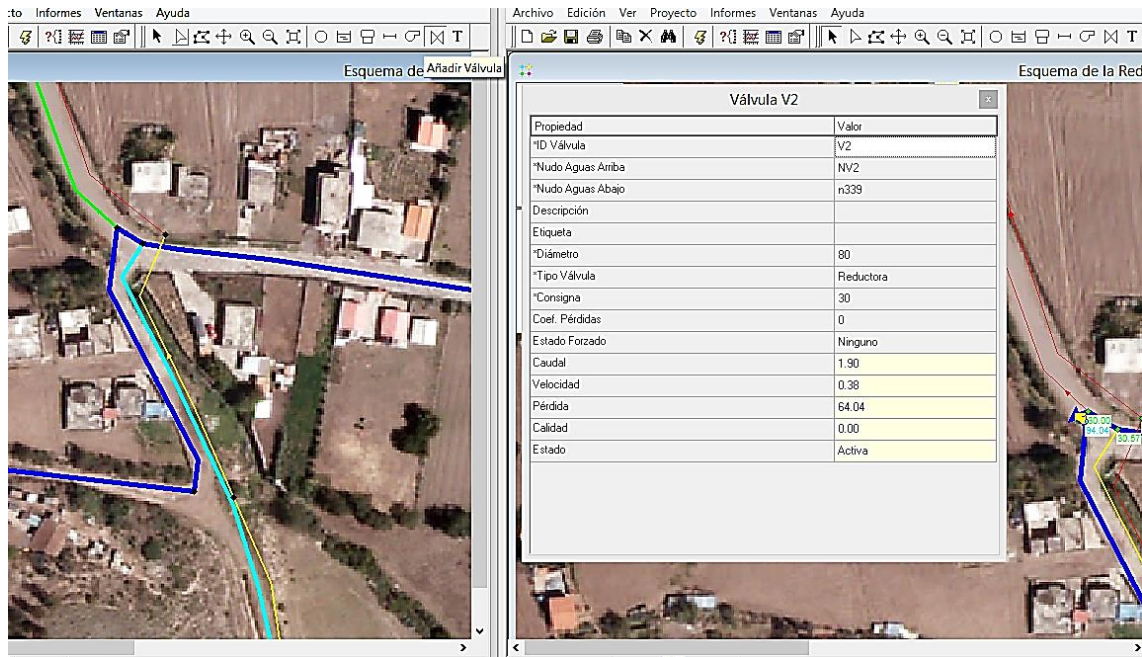


Figura 128 Introducción de válvula en Epanet.

#### 5.4 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA DESPUÉS DE GESTIONAR LAS PRESIONES

Como resultado de la colocación de las válvulas reductoras de presión en los sitios estratégicos de cada zona, se presenta una variación considerable en las horas de menor consumo tal como se visualiza en la Figura 129, también el volumen de agua inyectada al sistema disminuye, el volumen de agua fugada disminuye y se incrementa el rendimiento de la red de la ciudad Pujilí, para ello se colocó 7 válvulas reductoras del tipo (BERMAD 700 Y-Pattern V-Port).

Tabla 31 Válvulas a instalar.

VRP	DN(mm) (BERMAD 700 Y-Pattern V-Port)	Consigna (mca)
V1	50	25
V2	80	30
V3	100	20
V4	50	25
V5	50	25
V6	80	25
V7	80	25



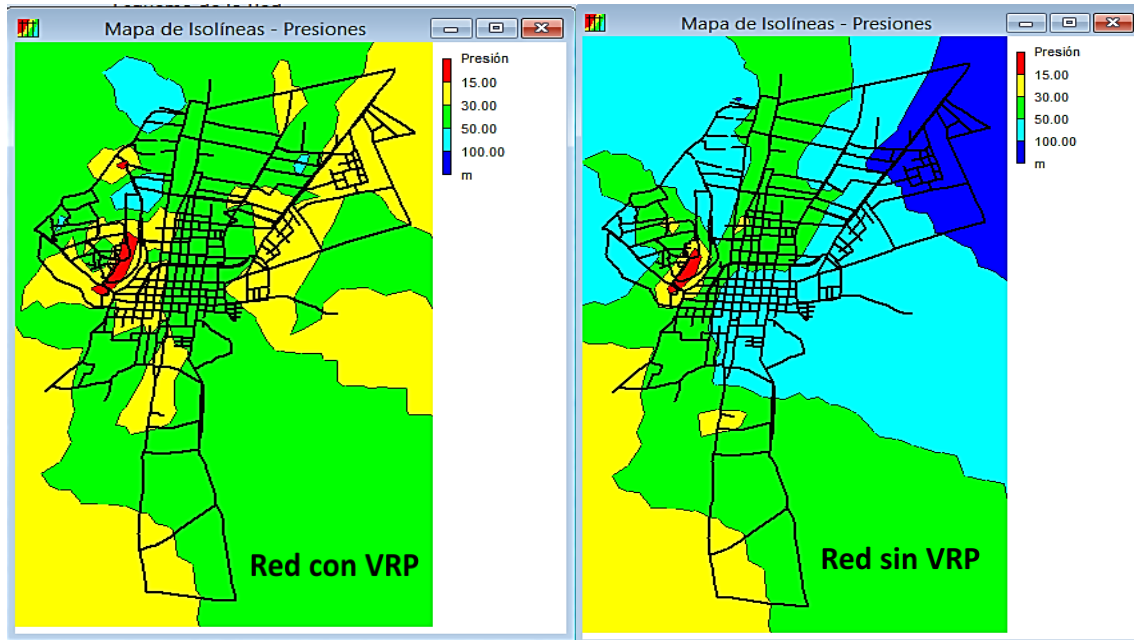


Figura 129 Mapa de Isolíneas presiones máximas con y sin VRP.

De la misma manera los rendimientos volumétricos tienen una variación considerable tal como se visualiza en la Tabla 33, pasando de un rendimiento global de 56% a un 60% así como de una valoración de inaceptable a malo (ver Tabla 28), por otro lado el rendimiento de la red pasa de 73% a 78% visualizándose así las mejoras.

Tabla 32 Datos para balance hídrico técnico red con VRP

Datos para balance hídrico técnico			
Tipo de caudal	red sin VRP	red con VRP	Unidad
<b>V (Volumen inyectado)</b>	1,973,419.2	1,861,950.2	m <sup>3</sup> /año
<b>Vi (Volumen incontrolado)</b>	859,983.3	748,514.3	m <sup>3</sup> /año
<b>Vr (Volumen Registrado)</b>	1,113,435.9	1,113,435.9	m <sup>3</sup> /año
<b>Vic (Volumen incontrolado consumido)</b>	332,669.7	332,669.7	m <sup>3</sup> /año
<b>Vif (Volumen incontrolado fugado)</b>	527,313.6	415,844.6	m <sup>3</sup> /año

Tabla 33 Rendimientos volumétricos del balance hídrico técnico red con VRP

Rendimientos Volumétricos		
Tipo de rendimiento	red sin VRP	red con VRP
<b>Rendimiento global del sistema</b> $ng=Vr/V$	56%	60%
<b>Rendimiento de la red</b> $nr=Vs/V$	73%	78%
<b>Rendimiento de la medición</b> $nm=Vr/Vs$	77%	77%

De igual manera se puede observar en la Figura 130 la evolución horaria del caudal medio inyectado a la red con y sin la gestión de presiones, es evidente que el caudal medio incontrolado fugado disminuye ya que es dependiente de la presión.

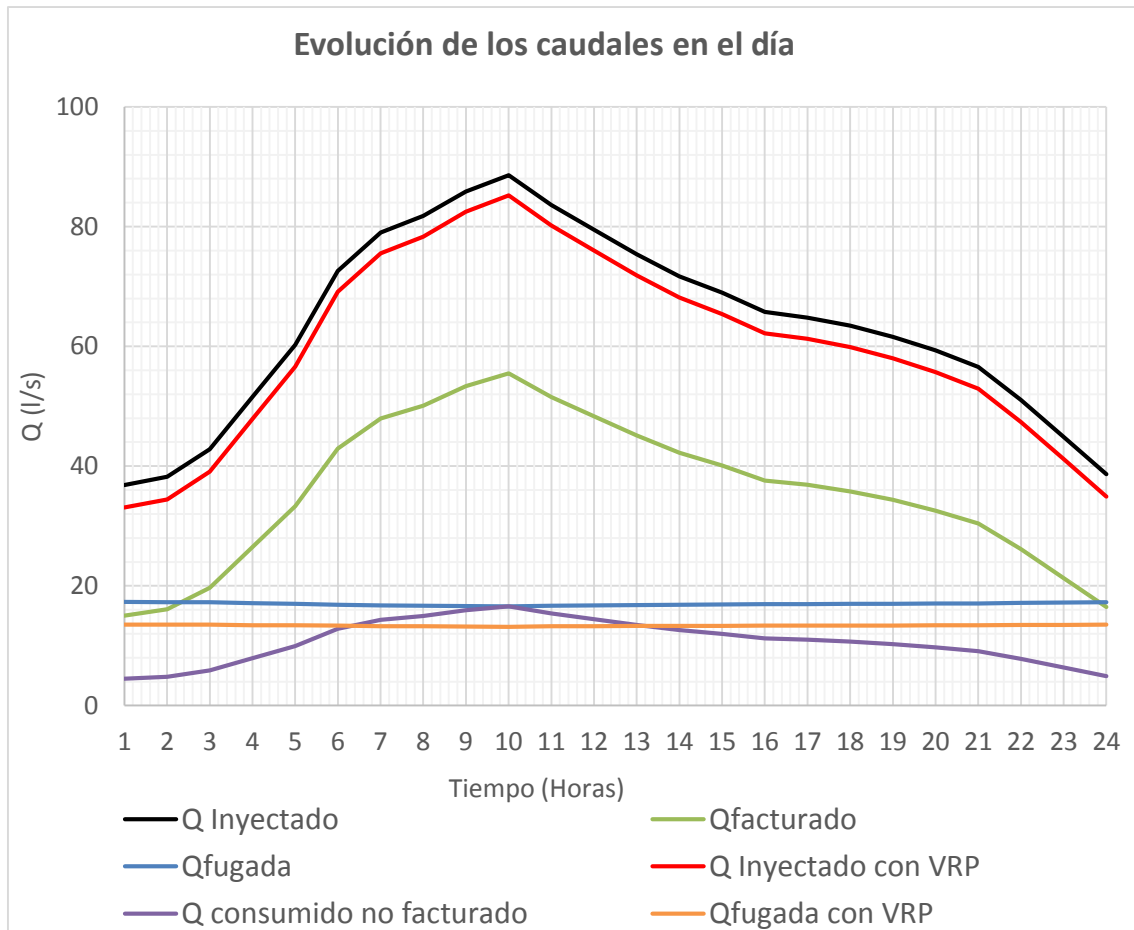


Figura 130 Evolución horaria de caudales.

El volumen anual de agua proveniente de las fugas disminuye considerablemente pasando de 527,313.6 m<sup>3</sup>/ año a 415844.6 m<sup>3</sup>/ año esto a su vez reporta una reducción del porcentaje de fugas de 26.70 % a 21.10 % como se observa en la Figura 131, por otro lado esta disminución representa un ahorro económico anual del agua inyectada tal como se visualiza en la Figura 132, dicho valor asciende a \$45,460.1 dólares anuales, para estos cálculos se consideró el caudal medio diario inyectado a la red después de gestionar las presiones.



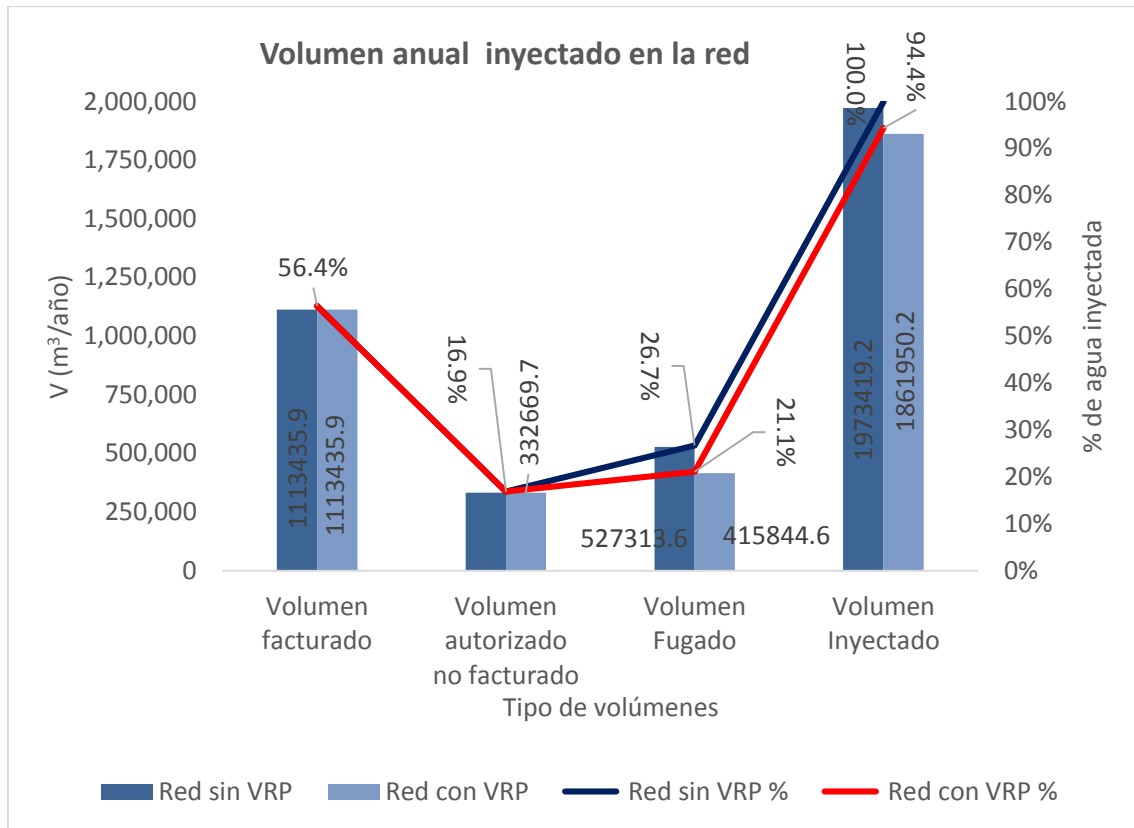


Figura 131 Volumen anual inyectado a la red con VRP.

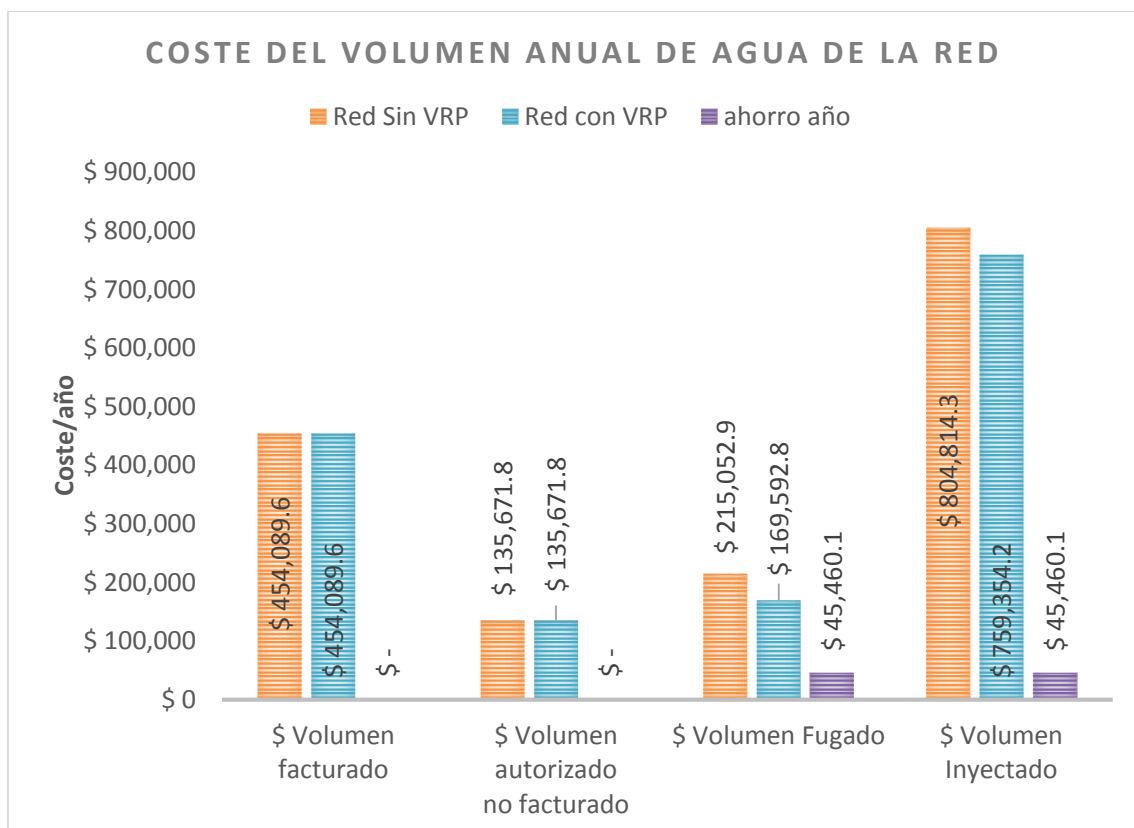


Figura 132 Coste anual de agua inyectada de la red con VRP.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalizado el trabajo, se recoge a continuación las conclusiones más significativas obtenidas con la elaboración de modelo matemático de la red de la ciudad de Pujilí.

- Se obtuvo un modelo matemático de la red existente de la ciudad de Pujilí que contiene caudales consumidos autorizados facturados, caudales consumidos autorizados no facturados y caudales fugados, este modelo permitirá mejorar la gestión ya que se aproxima al funciona miento real.
- El modelo creado en Epanet, permitirá hacer una evaluación aproximada a cualquier hora del día, también es posible simular cualquier acción antes de la toma una decisión.
- Una vez realizado el diagnóstico de la red existente, se obtuvo un rendimiento global de sistema de 56.40 %, un rendimiento de la red de 73.30 % y un rendimiento de la medición de 77 %, también se tiene velocidades máximas de 1.55 m/s y velocidades mínimas de 0.1 m/s, así mismo las perdidas unitarias registran valores entre 0.1 m/km hasta 12 m/km en su mayoría.
- En la red de abastecimiento de la ciudad de Pujilí se encuentran presiones altas de superiores a 100 mca ubicadas en las zonas bajas de la ciudad así como presiones de 10.43 mca en zonas cercanas a los tanques.
- Con la colocación de 7 VRP que permiten mejor la gestión de las presiones en la red se obtiene un rendimiento global de 60% y un rendimiento de la red de 78 %, mejorando en casi 5 %.
- El porcentaje de agua fugada paso de 26.7 % a 21.10 % mejorando significativamente.
- El costo anual de agua inyectada paso de 804,814.3 dólares a 759,354.2 dólares reportando un ahorro anual de 45,460.10 dólares aproximadamente.
- La presión promedio de la red bajo de 54.91 m.c.a a 31.77 m.c.a.
- La Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de Pujilí (EPAPAP), contara con un modelo en Epanet así como la red de agua potable de la ciudad en un sistema geográfico para mejorar la gestión en el futuro.
- Se recomienda tener un registro mensual del agua inyectada a la red, así como también la colocación de contadores a las instituciones que no pagan el servicio de agua potable para tener un mayor control y poder calibrar de mejor manera el modelo matemático.
- También se recomienda que cada usuario o contador esté debidamente referenciado a un sistema geográfico con el fin de identificar los consumos dentro de la red.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

### Lista de Referencias

- Almandoz, J., Cabrera, E., Arregui, F., Cabrera Jr, E., & Cobacho, R. (2005). Leakage assessment through water network. *researchgate*.
- Cabrera Marcet, E. (2005). Una aproximación a la problemática de las pérdidas de agua en redes urbanas. *Instituto Tecnológico del Agua (ITA)*.
- Cabrera, E., Espert, V., García - Serra, J., & Martínez, F. (1996). *Ingeniería Hidraulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua*. Valencia: Imprenta Sichert.
- Comite Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2011). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Pujilí. (14 de 10 de 2018). [www.municipiopujili.gob.ec](http://www.municipiopujili.gob.ec). Obtenido de <https://www.municipiopujili.gob.ec/pujili/>
- Iglesias Rey, P. L., & Martínez Solano, J. (2012). *Análisis y diseño de redes de distribución de agua mediante Epanet 2 vE*. Valencia: Gráficas Calasparra, S. Coop.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censo . (20 de Junio de 2010). [www.ecuadorencifras.gob.ec](http://www.ecuadorencifras.gob.ec). Obtenido de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec>
- Lewis A, R. (2017). *Epanet 2 Manual del Usuario*. Valencia.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2011). *Norma hidrosanitaria nhe agua*. Quito.
- Plastigama. (07 de 11 de 2018). [plastigama.com](http://plastigama.com). Obtenido de <http://plastigama.com/producto/presion-union-z/>
- Potable, E. M. (2009). *Norma de Diseño de Sistema de Agua Potable para la EMAAP-Q*. Quito: V&M Graficas.
- Secretaría del Agua. (2015). *Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes*. Quito.

## 8. ANEXOS

### 8.1 CÁLCULO DE CAUDAL INYECTADO EN EL DÍA

Tabla 34 Reporte diario del Modelo de Epanet

Hora	Q Inyectado l/s	Patrón	Q Facturado l/s	Q consumido no facturado l/s	Q Consumid o l/s	Q Fugada l/s
1	36.82	0.42	15.03	4.49	19.52	17.30
2	38.20	0.45	16.11	4.81	20.92	17.28
3	42.81	0.55	19.68	5.88	25.57	17.24
4	51.52	0.74	26.48	7.91	34.40	17.12
5	60.25	0.93	33.28	9.94	43.23	17.02
6	72.62	1.20	42.95	12.83	55.78	16.84
7	79.01	1.34	47.96	14.33	62.29	16.72
8	81.77	1.40	50.11	14.97	65.08	16.69
9	85.88	1.49	53.33	15.93	69.26	16.62
10	88.60	1.55	55.47	16.57	72.05	16.55
11	83.59	1.44	51.54	15.40	66.94	16.65
12	79.48	1.35	48.32	14.44	62.75	16.73
13	75.37	1.26	45.10	13.47	58.57	16.80
14	71.71	1.18	42.23	12.62	54.85	16.86
15	68.95	1.12	40.08	11.98	52.06	16.89
16	65.73	1.05	37.58	11.23	48.81	16.92
17	64.82	1.03	36.86	11.01	47.88	16.94
18	63.47	1.00	35.79	10.69	46.48	16.99
19	61.61	0.96	34.36	10.27	44.62	16.99
20	59.33	0.91	32.57	9.73	42.30	17.03
21	56.58	0.85	30.42	9.09	39.51	17.07
22	51.07	0.73	26.13	7.81	33.93	17.14
23	44.86	0.60	21.29	6.36	27.66	17.20
24	38.65	0.46	16.46	4.92	21.38	17.27
<b>Promedio</b>	63.45	1.00	35.80	10.70	46.49	16.97

## 8.2 EJEMPLO DE CÁLCULO DE VÁLVULAS

		SI 700 Metric														
		DN	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500
700 Y-Pattern Flat Disc	Kv	42	50	55	115	200	N/A	460	815	1,250	1,850	1,990	3,310	3,430	3,550	
	K	2.3	3.9	9.2	4.9	3.9	N/A	3.7	3.8	3.9	3.7	5.9	3.7	5.5	7.8	
	Leq - m	4.3	10.3	33.4	21.6	23	N/A	37.5	53.9	70	85.6	159.9	112.7	204.8	323.8	
700 Y-Pattern V-Port	Kv	36	43	47	98	170	N/A	391	693	1,063	1,573	1,692	2,814	2,916	3,018	
	K	3.1	5.4	12.8	6.7	5.4	N/A	5.2	5.2	5.4	5.1	8.2	5.1	7.6	10.8	
	Leq - m	6	14.3	46.2	29.9	31.9	N/A	51.9	74.6	96.8	118.4	221.3	155.9	283.5	448.1	
700-ES Y-Pattern Flat Disc	Kv	54	57	60	65	145	215	395	610	905	1,520	N/A	2,250	N/A	4,070	
	K	1.4	3.0	7.8	15.2	7.5	8.3	5.1	6.7	7.5	5.5	N/A	7.9	N/A	5.9	
	Leq - m	2.8	7.5	25.3	60.8	37.3	51.7	38.1	96.3	138.4	126.8	N/A	253.6	N/A	246.3	
700-ES Y-Pattern V-Port	Kv	46	48	51	55	123	183	336	519	769	1,292	N/A	2,027	N/A	3,460	
	K	1.9	4.3	10.8	21.2	10.4	11.4	7.0	9.3	10.4	7.6	N/A	9.8	N/A	8.2	
	Leq - m	3.8	10.6	34.9	84.9	51.8	71.4	52.7	133.0	191.7	175.5	N/A	312.4	N/A	340.8	
700 Angle Flat Disc	Kv	46	55	61	127	220	N/A	506	897	1,375	2,035	2,189	3,641	3,773	N/A	
	K	1.9	3.2	7.6	4	3.2	N/A	3.1	3.1	3.2	3.1	4.9	3	4.5	N/A	
	Leq - m	3.6	8.5	27.6	17.8	19	N/A	31	44.6	57.8	70.7	132.1	93.1	169.3	N/A	
700 Angle V-Port	Kv	39	47	51	108	187	N/A	430	762	1,169	1,730	1,861	3,095	3,207	N/A	
	K	2.6	4.5	10.6	5.6	4.5	N/A	4.3	4.3	4.5	4.2	6.8	4.2	6.2	N/A	
	Leq - m	5	11.8	38.2	24.7	26.4	N/A	42.9	61.7	80	97.9	182.9	128.9	234.3	NA	
700-M6 G-Pattern Flat Disc	DN	600	700	750	800	900										
	Kv	7,350	7,500	7,500	7,500	7,500										
	K	3.8	6.7	8.8	11.4	17.1										
Leq - m	189	200	250	260	281											

Figura 133 Catalogo de BERMAD

Tabla 35 Características de la válvula

Parámetros de cálculo Válvula del proyecto VRP 3		
DN	100	mm
Kv0	170	(m <sup>3</sup> /h)/(bar)



Tabla 36 Diseño de válvula

Válvula del proyecto VRP 3										
Horas	LPS	$\Delta p$ (mca)	Presión aguas arriba P1 (mca)	Presión consigna P2 (m.c.a)	Q (l/s)	Kv	Kv/Kv0	% Apertura asiento en V	Velocidad (m/s)	Condición
0:00	11.57	20.23	45.23	25	11.57	29.28	0.17	25%	1.473	No Cavita
1:00	10.91	20.31	45.31	25	10.91	27.56	0.16	25%	1.389	No Cavita
2:00	11.41	20.25	45.25	25	11.41	28.87	0.17	25%	1.453	No Cavita
3:00	13.05	20.02	45.02	25	13.05	33.20	0.20	26%	1.662	No Cavita
4:00	16.18	19.52	44.52	25	16.18	41.69	0.25	27%	2.060	No Cavita
5:00	19.31	18.91	43.91	25	19.31	50.55	0.30	30%	2.459	No Cavita
6:00	23.75	17.89	42.89	25	23.75	63.92	0.38	36%	3.024	No Cavita
7:00	26.05	17.28	42.28	25	26.05	71.34	0.42	41%	3.317	No Cavita
8:00	27.03	17	42	25	27.03	74.63	0.44	43%	3.442	No Cavita
9:00	28.51	16.57	41.57	25	28.51	79.73	0.47	46%	3.630	No Cavita
10:00	29.49	16.26	41.26	25	29.49	83.26	0.49	49%	3.755	No Cavita
11:00	27.69	16.81	41.81	25	27.69	76.88	0.45	44%	3.526	No Cavita
12:00	26.21	17.23	42.23	25	26.21	71.88	0.42	41%	3.337	No Cavita
13:00	24.73	17.63	42.63	25	24.73	67.05	0.39	38%	3.149	No Cavita
14:00	23.42	17.97	42.97	25	23.42	62.89	0.37	36%	2.982	No Cavita
15:00	22.43	18.21	43.21	25	22.43	59.84	0.35	34%	2.856	No Cavita
16:00	21.28	18.48	43.48	25	21.28	56.35	0.33	32%	2.709	No Cavita
17:00	20.95	18.56	43.56	25	20.95	55.36	0.33	32%	2.667	No Cavita
18:00	20.46	18.67	43.67	25	20.46	53.91	0.32	31%	2.605	No Cavita
19:00	19.8	18.81	43.81	25	19.8	51.97	0.31	31%	2.521	No Cavita
20:00	18.98	18.98	43.98	25	18.98	49.60	0.29	30%	2.417	No Cavita
21:00	17.99	19.18	44.18	25	17.99	46.76	0.28	29%	2.291	No Cavita
22:00	16.02	19.55	44.55	25	16.02	41.25	0.24	27%	2.040	No Cavita
23:00	13.8	19.91	44.91	25	13.8	35.21	0.21	26%	1.757	No Cavita
0:00	11.57	20.23	45.23	25	11.57	29.28	0.17	25%	1.473	No Cavita

### 8.3 PRESUPUESTO REFERENCIAL DE LA INSTALACIÓN DE LAS VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN

Tabla 37 Presupuesto de la implementación de VRP.

PROYECTO: PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE PUJILI					
N O.	RUBRO / DESCRIPCIÓN	UNID AD	CANTI DAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO GLOBAL
<b>CÁMARAS REDUCTORAS DE PRESIÓN (7 UNIDADES)</b>					
1	OBRA CIVIL EN ARQUETAS (VÁLVULAS)	U	7	1682.83	11779.80
2	INSTALACIÓN DE VÁLVULAS	U	7	562.58	3938.06
<b>V1_50_63</b>					
3	MARIPOSA WAFFER HD 2" VOLANTE	U	2	77.20	154.40
1	FILTRO CAZAPIEDRAS 2" ANSI 125 HD	U	1	180.60	180.60
4	VALVULA REDUCTORA 720-V 2" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	1,800.00	1800.00
2	VLV ALIVIO RAPIDO IR-43Q 1" ROSCADA PN10 C/PIL PLAST PC-3Q BERMAD	U	1	329.00	329.00
5	MARIPOSA WAFFER HD 2" VOLANTE	U	2	77.20	154.40
3	VALVULA REDUCTORA 720-V 2" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	1,800.00	1800.00
<b>V2_80_110</b>					
4	MARIPOSA WAFFER HD 3" VOLANTE	U	2	97.50	195.00
5	FILTRO CAZAPIEDRAS 3" ANSI 125 HD	U	1	217.00	217.00
6	VLV REDUCTORA ANTICAVITACION 720-ES-V 3" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	2,070.00	2070.00
7	VLV ALIVIO RAPIDO IR-43Q 1.1/2" ROSCA PN10 C/PIL PLAST PC-3Q BERMAD	U	1	376.00	376.00
8	MARIPOSA WAFFER HD 2" VOLANTE	U	2	77.20	154.40
9	VALVULA REDUCTORA 720-V 2" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	1,800.00	1800.00
<b>V3_100_160</b>					
10	MARIPOSA WAFFER HD 4" VOLANTE	U	2	128.00	256.00
11	FILTRO CAZAPIEDRAS 4" ANSI 150	U	1	246.00	246.00
12	VLV REDUCTORA ANTICAVITACION 720-ES-V 4" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	2,730.00	2730.00
13	VALVULA ALIVIO RAPIDO WW-43Q 2" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	876.00	876.00
14	MARIPOSA WAFFER HD 2" VOLANTE	U	2	77.20	154.40
15	VALVULA REDUCTORA 720-V 2" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	1,800.00	1800.00
<b>V4_50_160</b>					
16	MARIPOSA WAFFER HD 2" VOLANTE	U	2	77.20	154.40
17	FILTRO CAZAPIEDRAS 2" ANSI 125 HD	U	1	180.60	180.60
18	VALVULA REDUCTORA 720-V 2" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	1,800.00	1800.00
19	VLV ALIVIO RAPIDO IR-43Q 1" ROSCADA PN10 C/PIL PLAST PC-3Q BERMAD	U	1	329.00	329.00
20	MARIPOSA WAFFER HD 2" VOLANTE	U	2	77.20	154.40
21	VALVULA REDUCTORA 720-V 2" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	1,800.00	1800.00
<b>V5_50_90</b>					

22	MARIPOSA WAFFER HD 2" VOLANTE	U	2	77.20	154.40
23	FILTRO CAZAPIEDRAS 2" ANSI 125 HD	U	1	180.60	180.60
24	VALVULA REDUCTORA 720-V 2" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	1,800.00	1800.00
25	VLV ALIVIO RAPIDO IR-43Q 1" ROSCADA PN10 C/PIL PLAST PC-3Q BERMAD	U	1	329.00	329.00
26	MARIPOSA WAFFER HD 2" VOLANTE	U	2	77.20	154.40
27	VALVULA REDUCTORA 720-V 2" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	1,800.00	1800.00
<b>V6_80_110</b>					
28	MARIPOSA WAFFER HD 3" VOLANTE	U	2	97.50	195.00
29	FILTRO CAZAPIEDRAS 3" ANSI 125 HD	U	1	217.00	217.00
30	VLV REDUCTORA ANTICAVITACION 720-ES-V 3" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	2,070.00	2070.00
31	VLV ALIVIO RAPIDO IR-43Q 1.1/2" ROSCA PN10 C/PIL PLAST PC-3Q BERMAD	U	1	376.00	376.00
32	MARIPOSA WAFFER HD 2" VOLANTE	U	2	77.20	154.40
33	VALVULA REDUCTORA 720-V 2" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	1,800.00	1800.00
<b>V7_80_90</b>					
34	MARIPOSA WAFFER HD 3" VOLANTE	U	2	97.50	195.00
35	FILTRO CAZAPIEDRAS 3" ANSI 125 HD	U	1	217.00	217.00
36	VLV REDUCTORA ANTICAVITACION 720-ES-V 3" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	2,070.00	2070.00
37	VLV ALIVIO RAPIDO IR-43Q 1.1/2" ROSCA PN10 C/PIL PLAST PC-3Q BERMAD	U	1	376.00	376.00
38	MARIPOSA WAFFER HD 2" VOLANTE	U	2	77.20	154.40
39	VALVULA REDUCTORA 720-V 2" ANSI150 PN16 BERMAD	U	1	1,800.00	1800.00
				SUBTOTAL	\$ 49,472.66
				IVA 12%	\$ 5,936.72
				TOTAL	\$ 55,409.38

Respecto a costos de implementación de las válvulas automáticas reductoras de presión en la red de distribución de la ciudad de Pujilí asciende a \$ 55,409.38 dólares, como se puede visualizar en la Tabla 37.