

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**



**Propuesta de Separación a nivel de laboratorio de los Contaminantes del
agua lluvia que precipita en el municipio de Nejapa, en la zona del volcán de
San Salvador**

PRESENTADO POR

**BENITEZ TOBAR ESMIDIO ARISTIDES
GUERRA PEREZ HECTOR MANUEL
MIRANDA SANTILLANA DOUGLAS ALEXANDER**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2004

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA:

Dra. María Isabel Rodríguez

SECRETARIA GENERAL:

Licda. Lidia Margarita Muñoz Vela

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO:

Ing. Mario Roberto Nieto Lobo

SECRETARIO:

Ing. Oscar Eduardo Marroquín Hernández

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

DIRECTOR:

Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUIMICO

Título:

**Propuesta de Separación a nivel de laboratorio de los Contaminantes del
agua lluvia que precipita en el municipio de Nejapa, en la zona del volcán de
San Salvador**

Presentado por:

**BENITEZ TOBAR ESMIDIO ARISTIDES
GUERRA PEREZ HECTOR MANUEL
MIRANDA SANTILLANA DOUGLAS ALEXANDER**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya

Ing. Juan Rodolfo Ramírez Guzmán

Docente Director Externo:

Dr. Néstor Guillermo Orellana

San Salvador, Abril de 2004

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya

Ing. Juan Rodolfo Ramírez Guzmán

Docente Director Externo:

Dr. Néstor Guillermo Orellana

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo y la culminación de este trabajo de investigación fue posible gracias a la cooperación de miembros de la Directiva del Cantón San Jerónimo Los Planes, Nejapa.

También queremos agradecer a :

Lic. René Canjura, alcalde de Nejapa , por facilitar el contacto con la comunidad mencionada.

Dr. Néstor Orellana , asesor de este trabajo de investigación y profesor de la Escuela de Química, por proporcionar las herramientas que facilitaron el trabajo de análisis químico.

En especial agradecemos al personal de la Escuela de Ingeniería Química que contribuyeron en nuestra formación y al personal de la planta piloto : Sr. Alex Padilla y Sr. Morán.

DEDICATORIA

En primer lugar quiero dedicar este trabajo de graduación a nuestro Padre Jehová Dios y a su hijo Jesucristo por haberme dado la vida, la oportunidad de realizarme como persona así como el de alcanzar las metas que me he propuesto.

La culminación de mis estudios universitarios no solo fue el producto del esfuerzo y dedicación que puse para lograrlo sino también gracias al apoyo de dos personas muy especiales:

Mi abuela Lucila Benítez Ventura quien lamentablemente falleció y no pudo disfrutar los frutos de su amor y sacrificio lo cual solo una madre lo hace.

Mi padre Esmidio Arístides Benítez quien me ha dado su amor incondicionalmente, extralimitándose en su rol de padre siendo además mi amigo involucrándose en este trabajo para llegar a un termino exitoso.

Por lo cual les dedico este triunfo que he obtenido.

Esmidio Arístides Benítez Tobar

DEDICATORIA

A DIOS PADRE de toda misericordia y a JESUCRISTO por haberme permitido culminar en victoria esta carrera.

A mamá AMPARITO por su apoyo en innumerables oraciones.

A mi madre, Teresa de Jesús por su amor, comprensión y sacrificio, me dió fuerzas para alcanzar tan satisfactorio momento en mi vida.

A mi padre, José Manuel que con su paciencia, esfuerzo y amor colaboró a la realización de esta meta alcanzada.

A mis hermanos José Edwin, Néstor, Daysi dándome su compañía y cariño, también son parte de este logro.

A Samantha, la primera entre todas las arenas del mar.

A mis primos, que a LA distancia estuvieron apoyándome.

A Douglas y Esmidio por su incomparable paciencia.

A mis amigos Byron, Koki, Juan Antonio, Manuel Gallo, Daniel, Paco, Juan Ramírez, Alexié, Giovanni, René Meléndez, Sara, Daniel B. , Roberto A. , Danilo, Javi, Ricardo, Micha, Juan Pérez, René I., todos ustedes y otros que llevo en mi mente, me animaron y me ayudaron en distintas áreas de mi vida para llegar a realizar este sueño.

A mis profesores y maestros muchas gracias.

Héctor Guerra

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la Persona que desde los dieciocho años es el centro de mi vida : Dios. También a mis familiares y amigos.

Una cosa he demandado a Jehová, ésta buscaré; que esté yo en la casa de Jehová todos los días de mi vida , para contemplar la hermosura de Jehová, y para inquirir en su templo.

Salmo 27:4

Douglas Miranda

RESUMEN

Las comunidades que se han asentado en las zonas altas del volcán de San Salvador sufren a diario el problema de escasez de agua potable; esto debido a la ubicación geográfica, la ausencia de red pública de suministro y la carencia de recursos hídricos superficiales, así como subterráneos; lo que hace que el agua lluvia sea la única fuente que tengan a su disposición.

Esta forma de abastecimiento podría representar un riesgo a la salud de los habitantes de estas comunidades, ya que el acelerado deterioro de la calidad del aire de la zona puede repercutir en mayores incidencias de enfermedades producidas por la ingesta de agua lluvia con contaminantes atmosféricos.

De los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico del agua lluvia de la zona de estudio, se encontró que dos son los contaminantes que se encontraron fuera de los niveles permitidos . el pH y la dureza . A continuación se describen los resultados.

1. Las muestras de agua lluvia colectada en los tanques de captación y almacenamiento fueron las únicas que mostraron valores altos de pH y fuera de la Norma Salvadoreña Obligatoria Para La calidad del Agua Potable (NSO #01ES/2000) que es de 6.0 a 8.5 unidades de pH. En el tanque comunal, el 82 % de las muestras arrojaron valores fuera de la norma, mientras que en el tanque familiar fue de 66% de muestras fuera de norma. En los otros colectores, el pH se mantuvo dentro de la norma, con algunas excepciones del punto testigo. Esto nos lleva a la conclusión de que el agua que se consume directamente de tanques de almacenamiento posee una calidad no apta y requiere un tratamiento de ajuste de pH.

2. El agua lluvia almacenada en tanques de construcción mixta poseen valores de dureza que superan el valor recomendado (400 mg/L, NSO #01ES/2000). Se puede suponer que hay una dilución de elementos que aumentan la dureza ya que se ha comprobado en los colectores No. 1 y No. 2 que el agua de lluvia colectada en recipientes plásticos posee una dureza promedio de 56.01, 50.15 y 101.8 mg/L en los puntos No 1, 2 y 4 respectivamente.

Debe notarse que hay una disminución de la dureza de los tanques de almacenamientos a medida que avanza el invierno, sin embargo, esto solo representa el comportamiento en esta época.

Puede suponerse que en la época seca, la dureza puede aumentar por efecto de concentración. Lo anterior nos lleva a la conclusión de la necesidad de aplicar un tratamiento adecuado que reduzca la dureza del agua almacenada.

3. Los demás parámetros analizados (sulfatos, nitratos, cloruros, conductividad eléctrica, dióxido de carbono y temperatura) se encuentran dentro de los niveles permitidos por la NSO.

Para probar la efectividad de remoción de los contaminantes, se construyeron seis filtros a escala de laboratorio, los cuales contenían los materiales : perlita, malla 20, perlita ,malla 30, arena malla 30, piedra volcánica calcinada, malla 20, piedra volcánica sin calcinar, malla 20, arena y carbón activado, malla 20. estos materiales se sometieron a diferentes procesos físicos y químicos para mejorar sus características adsorbentes.

Las pruebas de separación de contaminantes se desarrollaron en dos etapas :

1. Prueba de la efectividad de remoción de contaminantes en los materiales filtrantes cuando el afluente contiene un solo contaminante en específico.
2. Tratamiento de agua lluvia.

Los resultados más importantes obtenidos de estas pruebas son :

1. Bajo las condiciones experimentales a las que fue sometida la perlita expandida, se encontró que tiene la mejor capacidad de reducir el pH del agua lluvia con las características físico-químicas ya descritas. También presentó buenas propiedades para la remoción de los otros contaminantes analizados, dando una respuesta estable con el aumento del volumen de agua tratada.
2. La dureza del agua lluvia aquí descrita puede ser removida y llevada a valores aceptables por la NSO #01ES/2000 utilizando una combinación de arena de río y carbón activado sometidos a un tratamiento físico y químico descrito en esta investigación.

| CONTENIDO | INDICE | PAGINA |
|---|--------|-------------|
| RESUMEN. | | i |
| INDICE GENERAL. | | iv |
| INDICE DE FIGURAS. | | xiii |
| INDICE DE TABLAS. | | xv |
| INDICE DE GRAFICAS. | | xx |
| INTRODUCCIÓN. | | 1 |
| CAPITULO I | | |
| CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA | | |
| 1.1. COMPOSICIÓN GENERAL DEL AIRE. | | 3 |
| 1.2. FUENTES DE CONTAMINACIÓN. | | 6 |
| 1.3. CLASIFICACION DE LOS CONTAMINANTES.. | | 6 |
| 1.3.1. CONTAMINANTES PRIMARIOS. | | 8 |
| 1.3.1.1. MONÓXIDO DE CARBONO. | | 9 |
| 1.3.1.2. OXIDOS DE AZUFRE (SOX). | | 10 |
| 1.3.1.3. OXIDOS DE NITRÓGENO (NOX). | | 11 |
| 1.3.1.4. HIDROCARBUROS (HC). | | 12 |
| 1.3.1.5. MACROPARTICULAS. | | 12 |
| 1.3.1.6. PARTICULAS LIQUIDAS. | | 13 |
| 1.3.2. CONTAMINANTES SECUNDARIOS. | | 13 |
| 1.3.3. QUÍMICA ATMOSFERICA. | | 14 |
| 1.3.3.1 OZONO. | | 14 |
| 1.3.3.2 COMPUESTOS NITROGENADOS.. | | 15 |
| 1.3.3.3 COMPUESTOS AZUFRADOS. | | 17 |

| | | |
|---------|--|----|
| 1.3.3.4 | COMPUESTOS CARBONADOS. | 17 |
| 1.3.4. | COMPUESTOS HALOGENADOS. | 17 |
| 1.4. | EFFECTOS METEREOLÓGICOS. | 18 |
| 1.4.1. | TRANSPORTE A LARGA DISTANCIA. | 18 |
| 1.4.2. | DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES. | 19 |
| 1.4.3. | EL VIENTO. | 19 |
| 1.4.4. | LA TURBULENCIA.. . . . | 20 |
| 1.4.5. | EFFECTOS TOPOGRÁFICOS.. . . . | 20 |
| 1.4.6. | PRECIPITACIONES. | 20 |
| 1.5. | PROCESOS DE LA CONTAMINACION DEL AGUA LLUVIA. . . | 21 |
| 1.6. | CONTAMINACION ATMOSFÉRICA EN EL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR. | 24 |
| 1.7. | CONTAMINACION DEL AGUA LLUVIA EN EL AMSS. | 27 |
| 1.7.1 | LA LLUVIA ACIDA EN EL AMSS. | 28 |

CAPITULO II

EFFECTOS A LA SALUD POR EL CONSUMO DE AGUA

| | | |
|--------|---|----|
| 2.1. | RIESGOS QUÍMICOS RELACIONADOS CON EL AGUA DE CONSUMO. | 29 |
| 2.2. | EFFECTOS EN LA SALUD POR CONSUMO DE AGUA CONTAMINADA POR AGENTES QUÍMICOS. | 30 |
| 2.2.1. | DUREZA DEL AGUA. | 30 |
| 2.2.2. | NITRITOS Y NITRATOS. | 30 |
| 2.2.3. | SULFATOS. | 31 |
| 2.2.4. | METALES PESADOS. | 31 |

CAPITULO III

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO

| | |
|--|----|
| 3.1. ASPECTO FISICO. | 33 |
| 3.2. FLORA. | 34 |
| 3.3. CLIMA. | 35 |
| 3.4. POBLACIÓN. | 35 |
| 3.5. ESTRUCTURA FÍSICA. | 35 |
| 3.6. ABASTECIMIENTO DE AGUA Y SANEAMIENTO. | 36 |
| 3.6.1. USOS DEL AGUA EN EL CANTON | |
| SAN JERÓNIMO LOS PLANES. | 37 |
| 3.6.2. SANEAMIENTO AMBIENTAL. | 38 |

CAPITULO IV

MUESTREO DE AGUA LLUVIA

| | |
|--|----|
| 4.1. DISEÑO DEL EQUIPO COLECTOR. | 41 |
| 4.1.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL | |
| Y DEL EQUIPO COLECTOR. | 41 |
| 4.1.1.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO COLECTOR.. . . . | 41 |
| 4.2. DISEÑO DEL EQUIPO PARA TOMA DE MUESTRA. | 43 |
| 4.3. EQUIPO AUXILIAR Y EQUIPO | |
| PARA MEDICIONES DE CAMPO. | 45 |
| 4.4. UBICACIÓN Y CARACTERISTICAS | |
| DEL PUNTO DE MUESTREO. | 46 |
| 4.5. UBICACION DEL COLECTOR. | 46 |
| 4.6. VOLUMEN DE MUESTREO A COLECTAR. | 47 |
| 4.7. PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA | |
| Y ENVIO DE LA MUESTRA. | 47 |
| 4.8. TRANSPORTE DE LA MUESTRA. | 49 |
| 4.9. FRECUENCIA DE MUESTREO. | 49 |

| | |
|--|----|
| 4.10. PLANEACIÓN DEL MUESTREO DE AGUA LLUVIA.. | 50 |
| 4.11. PLAN DE ANÁLISIS ESTABLECIDO. | 54 |
| 4.11.1. MEDICIÓN DE PARÁMETROS.. | |
| FÍSICOS. | 54 |
| 4.11.1.1. TEMPERATURA. | 54 |
| 4.11.1.2. pH. | 55 |
| 4.11.1.3. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. | 55 |
| 4.11.1.4. VOLUMEN PRECIPITADO. | 55 |
| 4.11.2. ANÁLISIS DE CONTAMINANTES. | |
| (PARÁMETROS QUÍMICOS). | 55 |
| 4.11.2.1. NITRATOS. | 56 |
| 4.11.2.2. SULFATOS. | 56 |
| 4.11.2.3. CLORUROS. | 56 |
| 4.11.2.4. DIÓXIDO DE CARBONO. | 56 |
| 4.11.2.5. DUREZA TOTAL. | 56 |

CAPITULO V

DETERMINACIONES ANALÍTICAS

| | |
|---|----|
| 5.1. PRIORIDAD DE LOS ANÁLISIS. | 57 |
| 5.2. CRITERIOS PARA SELECCIONAR VARIABLES | |
| FÍSICAS Y QUÍMICAS.. | 57 |
| 5.2.1. SELECCIÓN DE VARIABLES FÍSICAS. | 58 |
| 5.2.2.1. TEMPERATURA. | 58 |
| 5.2.2.2. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. | 58 |
| 5.2.2.3. VOLUMEN PRECIPITADO. | 58 |
| 5.2.2. SELECCIÓN DE VARIABLES QUÍMICAS. | 59 |
| 5.2.2.1. pH. | 59 |
| 5.2.2.2. DIÓXIDO DE CARBONO. | 59 |
| 5.2.2.3. NITRATOS. | 59 |
| 5.2.2.4. SULFATOS. | 60 |

| | | | |
|----------|---------------|-----------|----|
| 5.2.2.5. | CLORUROS. | | 60 |
| 5.2.2.6. | DUREZA TOTAL. | | 60 |

CAPITULO VI

CARCATERIZACION FISICOQUÍMICA DEL AGUA LLUVIA

| | | | |
|--------|--|-----------|----|
| 6.1. | REPORTE DEL VOLUMEN PRECIPITADO. | | 61 |
| 6.2. | COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE CAIDA DEL AGUA LLUVIA. | | 62 |
| 6.2.1. | EN LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO. | | 62 |
| 6.2.2. | EN LOS COLECTORES. | | 63 |
| 6.2.3. | ESTADISTICOS CALCULADOS. | | 64 |
| 6.3. | COMPORTAMIENTO DEL pH DEL AGUA LLUVIA. | | 65 |
| 6.3.1. | PUNTO DE MUESTREO No 1. | | 65 |
| 6.3.2. | PUNTO DE MUESTREO No 2. | | 65 |
| 6.3.3. | PUNTO DE MUESTREO No 3. | | 65 |
| 6.3.4. | PUNTO DE MUESTREO No 4. | | 65 |
| 6.3.5. | PUNTO DE MUESTREO No 5. | | 65 |
| 6.3.6. | COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL pH EN LOS SITIOS DE MUESTREO. | | 66 |
| 6.3.7. | ESTADISTICOS CALCULADOS. | | 69 |
| 6.4. | COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. | | 70 |
| 6.4.1. | COMPARACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. EN LOS SITIOS DE MUESTREO. | | 71 |
| 6.4.2. | ESTADISTICOS CALCULADOS. | | 72 |
| 6.5. | COMPORTAMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO. | | 73 |
| 6.5.1. | COMPARACION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO. | | 73 |
| 6.5.2. | ESTADISTICOS CALCULADOS. | | 74 |
| 6.6. | COMPORTAMIENTO DEL ION NITRATO. | | 75 |
| 6.7. | COMPORTAMIENTO DEL ION SULFATO. | | 76 |
| 6.7.1. | PUNTO DE MUESTREO No 1. | | 76 |
| 6.7.2. | PUNTO DE MUESTREO No 2. | | 76 |

| | | |
|---|-----------|----|
| 6.7.3. PUNTO DE MUESTREO No 3. | | 77 |
| 6.7.4. PUNTO DE MUESTREO No 4. | | 77 |
| 6.7.5. PUNTO DE MUESTREO No 5. | | 77 |
| 6.7.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS. | | 78 |
| 6.7.7. ESTADISTICOS CALCULADOS. | | 79 |
| 6.8. COMPORTAMIENTO DEL ION CLORURO. | | 80 |
| 6.9. COMPORTAMIENTO DE LA DUREZA TOTAL. | | 82 |
| 6.9.1. PUNTO DE MUESTREO No 1. | | 82 |
| 6.9.2. PUNTO DE MUESTREO No 2. | | 82 |
| 6.9.3. PUNTO DE MUESTREO No 3. | | 82 |
| 6.9.4. PUNTO DE MUESTREO No 4. | | 83 |
| 6.9.5. PUNTO DE MUESTREO No 5. | | 83 |
| 6.9.6. COMPARACIÓN DE LA DUREZA TOTAL EN LOS SITIOS DE MUESTREO. | | 83 |
| 6.9.7. ESTADISTICOS CALCULADOS. | | 85 |

CAPITULO VII

TRATAMIENTO DE AGUA PARA FINES DE CONSUMO HUMANO

| | | |
|--|-----------|----|
| 7.1. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS METODOS DE SEPARACIÓN. | | 86 |
| 7.2. LA ADSORCIÓN APLICADA EN EL TRATAMIENTO DE AGUA | | 87 |
| 7.2.1. ADSORCION EN SUPERFICIES SÓLIDAS.. | | 87 |
| 7.2.2. CARACTERISTICAS GENERALES DEL PROCESO DE ADSORCIÓN | | 88 |
| 7.2.3. EL INTERCAMBIO IÓNICO. | | 89 |
| 7.2.4. MATERIALES ADSORBENTES. | | 90 |
| 7.2.4.1. PIEDRA VOLCÁNICA. | | 92 |
| 7.2.4.2. ARENA. | | 94 |
| 7.2.4.3. PERLITA. | | 94 |

| | | |
|----------|--------------------------|----|
| 7.2.4.4. | CARBON ACTIVADO. | 96 |
|----------|--------------------------|----|

CAPITULO VIII

ETAPA EXPERIMENTAL: TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA

| | | |
|----------|---|-----|
| 8.1. | CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS DE ADSORCIÓN A ESCALA DE LABORATORIO. | 97 |
| 8.1.1. | PREPARACIÓN DEL MATERIAL ADSORBENTE. | 97 |
| 8.1.2. | CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS. | 101 |
| 8.2. | PRUEBAS DE SEPARACIÓN DE CONTAMINANTES. | 109 |
| 8.2.1. | PRUEBA DE LA EFECTIVIDAD DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS MATERIALES ADSORBENTES CUANDO EL AFLUENTE CONTIENE UN SOLO CONTAMINANTE EN ESPECIFICO. | 106 |
| 8.2.1.1. | LAVADO DE LAS COLUMNAS. | 107 |
| 8.2.1.2. | RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PREEXPERIMENTO. | 109 |
| 8.2.2. | TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA. | 111 |
| 8.3. | RESULTADOS OBTENIDOS. | 113 |

CAPITULO IX

ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

| | | |
|--------|--|-----|
| 9.1. | CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AFLUENTE TRATADO DURANTE LAS PRUEBAS DE REMOCIÓN. | 120 |
| 9.2. | ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE REMOCIÓN. | 122 |
| 9.3. | TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA, PARÁMETRO: pH. | 123 |
| 9.3.1. | pH EN LOS EFLUENTES. | 123 |
| 9.3.2. | PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL pH. | 124 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 9.4. | TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA, PARÁMETRO: CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. | 126 |
| 9.4.1. | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN LOS EFLUENTES. | 126 |
| 9.4.2. | PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE CADA MATERIAL. | 127 |
| 9.4.3. | OBSERVACIONES. | 128 |
| 9.5. | TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA, PARÁMETRO: CONCENTRACIÓN DEL ION NITRATO EN mg/L. | 129 |
| 9.5.1. | CONCENTRACIÓN DEL ION NITRATO EN EL EFLUENTE. | 129 |
| 9.5.2. | PORCENTAJE DE REMOCIÓN EN EL EFLUENTE. | 129 |
| 9.6. | TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA, PARÁMETRO: CONCENTRACIÓN DEL ION SULFATO EN mg/L. | 132 |
| 9.6.1. | CONCENTRACIÓN DEL ION SULFATO EN EL EFLUENTE. | 132 |
| 9.6.2. | PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE SULFATOS EN EL EFLUENTE. | 133 |
| 9.7. | TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA, PARÁMETRO: CONCENTRACIÓN DEL ION CLORURO EN mg/L. | 135 |
| 9.7.1. | CONCENTRACION DEL ION CLORURO EN EL EFLUENTE. | 135 |
| 9.7.2. | PORCENTAJE DE REMOCION. | 136 |
| 9.8. | TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA, PARÁMETRO: DUREZA TOTAL EXPRESADA COMO mg/L. | 137 |
| 9.8.1. | DUREZA TOTAL EN LOS EFLUENTES. | 138 |
| 9.8.2. | PORCENTAJE DE REMOCIÓN. | 138 |

| | | |
|---------|--|------------|
| 9.9 | ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LAS COLUMNAS MAS EFECTIVAS. | 140 |
| 9.9.1 | ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA COLUMNA DE PERLITA EXPANDIDA MALLA 30. | 141 |
| 9.9.1.1 | COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL EFLUENTE DE LA COLUMNA DE PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 CON OTROS CONTAMINANTES.. | 141 |
| 9.9.2 | ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA COLUMNA DE PIEDRA VOLCÁNICA CALCINADA. | 142 |
| 9.9.2.1 | PRESENCIA DE OTROS IONES. | 142 |
| 9.9.2.2 | COMPORTAMIENTO DEL ION SULFATO DEL EFLUENTE CON OTROS CONTAMINANTES. | 143 |
| 9.9.3 | ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA COLUMNA DE PIEDRA VOLCÁNICA SIN CALCINAR. | 145 |
| 9.9.3.1 | PRESENCIA DE OTROS IONES. | 145 |
| 9.9.3.2 | COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO DEL pH DEL EFLUENTE CON OTROS PARÁMETROS FISICO-QUÍMICOS.. . . . | 146 |
| 9.10 | NÁLISIS DE LOS ANIONES EN LOS EFLUENTES. | 147 |
| 9.11 | ELECCIÓN DEL MATERIAL ADSORBENTE PARA LA REDUCCIÓN DE pH Y DUREZA TOTAL. | 150 |
| | CONCLUSIONES. | 152 |
| | RECOMENDACIONES. | 154 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 156 |
| | ANEXOS. | 160 |

INDICE DE FIGURAS

| FIGURA | DESCRIPCION | PAGINA |
|--------|---|--------|
| 1.1 | MECANISMOS DE TRANSFORMACION QUIMICA | 22 |
| 1.2 | MECANISMOS DE FORMACIÓN DE SO ₃ y NO ₂ | 23 |
| 3.1 | ASPECTO FÍSICO PREDOMINANTE EN LA ZONA DE ESTUDIO | 34 |
| 3.2 | CAMINO RURAL DEL CANTÓN SAN JERÓNIMO LOS PLANES | 34 |
| 3.3 | TECHO DE VIVIENDA UBICADA EN EL CANTÓN SAN JERÓNIMO LOS PLANES, NEJAPA. AL FONDO PUEDE VERSE “EL PICACHO” | 35 |
| 3.4 | PAREDES DE VIVIENDAS. EN PRIMER PLANO SE OBSERVA UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO | 36 |
| 3.5 | TRANSPORTE DE AGUA LLUVIA COLECTADA HACIA UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO | 37 |
| 3.6 | RECEPCIÓN DE AGUA LLUVIA EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO. | 37 |
| 4.1 | DIMENSIONES DEL COLECTOR DE AGUA LLUVIA | 41 |
| 4.2 | COLECTOR DE AGUA LLUVIA | 41 |
| 4.3 | COLECTOR CON CEDAZO PLÁSTICO. | 43 |
| 4.4 | ENVASES PARA TOMA DE MUESTRA. | 44 |

| FIGURA | DESCRIPCION | PAGINA |
|--------|---|--------|
| 4.5 | EQUIPO AUXILIAR Y PARA MEDICIONES DE CAMPO. | 45 |
| 4.6 | TOMA DE MUESTRA EN LA SALIDA DE UN TANQUE COMUNAL | 47 |
| 4.7 | VIÑETA PARA EL REGISTRO DE DATOS | 48 |
| 4.8 | COLOCACIÓN DE LA VIÑETA EN EL ENVASE DE MUESTRA | 49 |
| 4.9 | MACROUBICACION DE LOS PUNTO DE MUESTREO | 53 |
| 8.1 | TRATAMIENTO DE LOS MATERIALES | 98 |
| 8.2 | PARTES DE LA COLUMNA | 102 |
| 8.3 | CONJUNTO DE COLUMNAS UTILIZADAS | 111 |
| 8.4 | TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA | 112 |
| A1.1 | RELACIÓN DE pH, pOH Y CONCENTRACIÓN DE H ⁺ Y OH ⁺ | 173 |
| A1.2 | ESQUEMA DE LOS ELECTRODOS UTILIZADOS | 174 |
| A1.3 | PUENTE DE WHEASTONE PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA | 178 |

INDICE DE TABLAS

| TABLA | DESCRIPCION | PAGINA |
|-------|--|--------|
| 1.1 | COMPOSICIÓN DEL AIRE NATURAL | 3 |
| 1.2 | LIMITE DE CONCENTRACION DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS ESTABLECIDOS POR OMS Y EPA. | 24 |
| 1.3 | TENDENCIA IRREGULAR DE CONTAMINANTES EN LA ZONA URBANA | 25 |
| 1.4 | AMSS: NINELES DE CONTAMINACIÓN EN ZONAS ESPECIFICAS (diciembre de 1996) ($\mu\text{g/litro}$) | 27 |
| 2.1 | EFFECTOS A LA SALUD POR METALES PESADOS EN AGUA DE CONSUMO | 31 |
| 3.1 | USOS DE AGUA | 38 |
| 3.2 | SANEAMIENTO | 39 |
| 4.1 | RECIPIENTES PARA MUESTREO Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS | 43 |
| 4.2 | DISTRIBUCION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO | 51 |
| 6.1 | RESUMEN DE ESTADÍSTICOS. VARIABLE : TEMPERATURA EN °C | 64 |
| 6.2 | RESUMEN DE ESTADÍSTICOS .VARIABLE : pH | 69 |
| 6.3 | RESUMEN DE ESTADÍSTICOS VARIABLE : CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA ,($\mu\text{S/cm}$) | 72 |
| 6.4 | RESUMEN DE ESTADÍSTICOS VARIABLE : DIÓXIDO DE CARBONO (mg/L) | 74 |

| TABLA | DESCRIPCION | PAGINA |
|-------|--|--------|
| 6.5 | RESUMEN DE ESTADÍSTICOS. VARIABLE : CONCENTRACION DEL ION NITRATO (mg/L) | 76 |
| 6.6 | RESUMEN DE ESTADÍSTICOS. VARIABLE: CONCENTRACIÓN DEL IÓN SULFATO, mg/L | 79 |
| 6.7 | RESUMEN DE ESTADÍSTICOS. VARIABLE : CONCENTRACION DEL ION CLORURO EN mg/L | 81 |
| 6.8 | RESUMEN DE ESTADÍSTICOS. VARIABLE : DUREZA TOTAL EXPRESADA COMO CaCO ₃ | 85 |
| 7.1 | COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA PIEDRA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN DE QUEZALTEPEQUE Y SAN MIGUEL | 92 |
| 7.2 | PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA PERLITA CRUDA | 95 |
| 8.1 | TRATAMIENTO FISICO-QUÍMICO APLICADO A LOS MEDIOS ADSORBENTES | 99 |
| 8.2 | CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE LAS COLUMNAS | 103 |
| 8.3 | SOLUCIONES ESTÁNDAR QUE PASARON POR LAS COLUMNAS | 106 |
| 8.4 | LAVADO DE LAS COLUMNAS | 107 |
| 8.5 | pH DEL EFLUENTE , SOLUCIONESTÁNDAR : CLORURO DE CALCIO | 109 |
| 8.6 | CONDUCTIVIDAD ELECTRICA μ S/cm, SOLUCION ESTÁNDAR : CaCl ₂ 25 mg/L | 109 |
| 8.7 | CONCENTRACION DE SULFATOS mg/L, SOLUCION ESTÁNDAR : Na ₂ SO ₄ 25 mg/L | 110 |
| 8.8 | DUREZA TOTAL mg/L CaCO ₃ , SOLUCION ESTÁNDAR : CaCl ₂ 25 mg/L | 110 |

| TABLA | DESCRIPCION | PAGINA |
|-------|--|--------|
| 8.9 | CONCENTRACION DEL ION HIDRÓGENO (pH) | 113 |
| 8.10 | CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (μ Siemens/ cm) | 114 |
| 8.11 | CONCENTRACION DEL ION NITRATO (mg/L) | 115 |
| 8.12 | CONCENTRACION DEL ION SULFATO (mg/L) | 116 |
| 8.13 | CONCENTRACION DEL ION CLORURO (mg/L) | 117 |
| 8.14 | DUREZA TOTAL EXPRESADA COMO mg/L DE CaCO_3 | 118 |
| 9.1 | CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS DEL AGUA LLUVIA UTILIZADA PARA LAS PRUEBAS DE REMOCIÓN | 121 |
| 9.2 | RELACION ENTRE IONES EN EL EFLUENTE | 147 |
| 9.3 | PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN LA REMOCIÓN DE LOS | 150 |
| A1.1 | VALORES DE CONDUCTIVIDAD DE ALGUNAS MUESTRAS TÍPICAS | 177 |
| A1.2 | PREPARACIÓN DE SOLUCIONES PATRÓN DILUIDOS | 190 |
| A1.3 | MICRO LITROS AÑADIDOS DE SOLUCIÓN PATRÓN | 194 |
| A1.4 | INTERPRETACIÓN DE LA DUREZA | 196 |

| TABLA | DESCRIPCION | PAGINA |
|-------|--|--------|
| A1.5 | INTERFERENCIAS DEL MÉTODO TITRIMETRICO CON EDTA | 197 |
| A2.1 | MICRO LITROS AÑADIDOS DE SOLUCIÓN PATRÓN DE NITRATOS | 202 |
| A2.2 | CALCULO DE LA FUNCIÓN GRAM | 203 |
| A2.3 | CALCULO DE LA CONCENTRACION DE NITRATOS | 206 |
| A2.4 | ABSORBANCIAS DE LAS SOLUCIONES PATRON | 206 |
| A2.5 | CALCULO DE LA CONCENTRACION DE SULFATOS | 207 |
| A3.1 | PARÁMETROS A DETERMINAR EN LA VALIDACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS SEGÚN EL OBJETIVO DE LOS MISMOS | 210 |
| A3.2 | RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE CLORUROS POR EL MÉTODO DE ELECTRODOS SELECTIVOS | 213 |
| A3.3 | CALCULO DE LOS RESIDUOS | 214 |
| A3.4 | CALCULO DE LA COCENTRACION DE CLORUROS | 217 |
| A3.5 | PARÁMETROS DE CALIDAD PARA LA PRECISIÓN DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS | 219 |
| A3.6 | RESUMEN DE ESTADÍSTICOS. VARIABLE : CONCENTRACION DEL ION CLORURO EN mg/L | 220 |
| A3.7 | RESULTADOS DE UNA CURVA DE CALIBRACIÓN EN LA MEDICIÓN DE CLORUROS | 222 |

| TABLA | DESCRIPCION | PAGINA |
|-------|---|--------|
| A3.8 | CALCULO DEL LIMITE DE DETECCIÓN (CM) | 223 |
| A.4 | REQUISITOS DE CALIDAD FISICOQUÍMICA (NORMA OBLIGATORIA SALVADOREÑA) | 225 |

INDICE DE GRAFICAS

| GRAFICA | DESCRIPCIÓN | PAGINA |
|---------|--|--------|
| 6.1 | VOLUMEN DE AGUA LLUVIA COLECTADA EN LA ZONA DE ESTUDIO | 62 |
| 6.2 | VARIACION DE LA TEMPERATURA DE CAIDA DEL AGUA LLUVIA QUE PRECIPITA EN SAN JERONIMO LOS PLANES, NEJAPA. INVIERNO DE 2003 | 63 |
| 6.3 | TEMPERATURA DEL AGUA LLUVIA EN LOS PUNTOS DE MUESTREO | 64 |
| 6.4 | VARIACION DEL pH PROMEDIO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO | 66 |
| 6.5 | COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL pH PROMEDIO GLOBAL EN LOS SITIOS DE MUESTREO | 67 |
| 6.6 | PORCENTAJE DE MUESTRAS DE AGUA LLUVIA PARA CADA RANGO DE pH EN EL CANTON SAN JERONIMO LOS PLANES, NEJAPA. INVIERNO DE 2003 | 68 |
| 6.7 | VARIACION DEL pH CON EL TIEMPO EN EL CANTON SAN JERONIMO LOS PLANES, NEJAPA. EPOCA INVERNAL 2003 | 69 |
| 6.8 | CONDUCTIVIDAD ELECTRICA PROMEDIO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO | 70 |
| 6.9 | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA PROMEDIO GLOBAL DE LAS PRECIPITACIONES EN SAN JERÓNIMO LOS PLANES, NEJAPA, INVIERNO DE 2003. | 71 |
| 6.10 | VARIACION DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DEL AGUA LLUVIA DEL CANTON SAN JERONIMO LOS PLANES, NEJAPA. INVIERNO DE 2003 | 72 |

| GRAFICA | DESCRIPCIÓN | PAGINA |
|---------|---|--------|
| 6.11 | CONCENTRACION PROMEDIO GLOBAL DEL DIOXIDO DE CARBONO EN EL AGUA LLUVIA | 73 |
| 6.12 | VARIACION DEL DIOXIDO DE CARBONO CON EL TIEMPO | 74 |
| 6.13 | CONCENTRACION DEL ION NITRATO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO | 75 |
| 6.14 | VARIACION DEL ION SULFATO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO | 77 |
| 6.15 | CONCENTRACION PROMEDIO GLOBAL DE SULFATOS EN CADA PUNTO DE MUESTREO | 78 |
| 6.16 | VARIACION DEL ION SULFATO CON EL TIEMPO DE LAS PRECIPITACIONES EN SAN JERONIMO LOS PLANES, NEJAPA, INVIERNO DE 2003 | 79 |
| 6.17 | CONCENTRACION PROMEDIO GLOBAL DEL ION CLORURO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO | 80 |
| 6.18 | VARIACIÓN DEL ION CLORURO EN EL AGUA LLUVIA DEL CANTON SAN JERÓNIMO LOS PLANES, NEJAPA. INVIERNO DE 2003 | 81 |
| 6.19 | DUREZA TOTAL PROMEDIO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO | 84 |
| 6.20 | DUREZA PROMEDIO GLOBAL EXPRESADA COMO mg/L DE CaCO_3 DE LAS PRECIPITACIONES EN SAN JERONIMO LOS PLANES, NEJAPA, INVIERNO DE 2003 | 84 |
| 6.21 | DUREZA TOTAL DEL AGUA LLUVIA EN SAN JERONIMO LOS PLANES, NEJAPA, INVIERNO DE 2003 | 85 |

| GRAFICA | DESCRIPCIÓN | PAGINA |
|---------|---|--------|
| 9.1 | pH EN LOS EFLUENTES A 500 mL Y 1000 mL | 123 |
| 9.2 | COLUMNA QUE MEJOR REDUCE EL pH A 500 mL | 124 |
| 9.3 | COLUMNA QUE MEJOR REDUCE EL pH A 1000 mL | 124 |
| 9.4 | CONDUCTIVIDAD ELECTRICA EN LOS EFLUENTES | 126 |
| 9.5 | COLUMNA QUE MEJOR REDUCE LA C.E. A 500 mL | 126 |
| 9.6 | COLUMNA QUE MEJOR REDUCE LA C.E. A 1000mL | 127 |
| 9.7 | COLUMNA QUE MEJOR REDUCE A 1500 mL | 127 |
| 9.8 | CONCENTRACION DEL ION NITRATO EN EL EFLUENTE A DIFERENTES NIVELES DE VOLUMEN DE AGUA LLUVIA TRATADA | 129 |
| 9.9 | COLUMNA QUE MEJOR REMUEVE NITRATOS A DIFERENTES NIVELES DE VOLUMEN DE AGUA LLUVIA TRATADA | 130 |
| 9.10 | CONCENTRACION DEL ION SULFATO EN LOS EFLUENTES | 132 |
| 9.11 | MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE SULFATOS A 500 mL | 132 |
| 9.12 | MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE SULFATOS A 1000 mL | 133 |
| 9.13 | VARIACIÓN DEL ION CLORURO EN LOS EFLUENTES | 134 |

| GRAFICA | DESCRIPCIÓN | PAGINA |
|---------|---|--------|
| 9.14 | MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE CLORURO A 500 mL | 135 |
| 9.15 | MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE CLORURO A 1000 mL | 135 |
| 9.16 | MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE CLORUROS A 1500 mL | 136 |
| 9.17 | VARIACION DE LA DUREZA EN LOS EFLUENTES | 137 |
| 9.18 | MATERIAL QUE MEJOR REDUCE LA DUREZA A 500 mL | 137 |
| 9.19 | MATERIAL QUE MEJOR REDUCE LA DUREZA A 1000 mL | 138 |
| 9.20 | COMPARACIÓN DEL % DE REMOCION PARA EL FILTRO DE PERLITA MALLA 30 | 140 |
| 9.21 | PORCENTAJE DE REMOCIÓN, COLUMNA DE PERLITA MALLA 30 | 141 |
| 9.22 | MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE SULFATOS (SOLUCION ESTÁNDAR : Na_2SO_4 25 mg/L) | 142 |
| 9.23 | COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCION DE LA PIEDRA VOLCÁNICA CALCINADA | 143 |
| 9.24 | PORCENTAJE REMOCIÓN, PIEDRA VOLCÁNICA CALCINADA | 143 |
| 9.25 | MATERIAL QUE MEJOR REDUCE EL pH (SOLUCION DE CLORURO DE CALCIO) | 144 |
| 9.26 | COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN LA PIEDRA VOLCÁNICA SIN CALCINAR | 145 |

| GRAFICA | DESCRIPCIÓN | PAGINA |
|---------|--|--------|
| 9.27 | PORCENTAJE DE REMOCION EN LA PIEDRA VOLCÁNICA SIN CALCINAR | 146 |
| 9.28 | RELACION DE IONES EN EL EFLUEN | 148 |
| A2.1 | CURVA DEL log CONC-mV | 204 |
| A2.2 | AJUSTE DE MINIMOS CUADRADOS PARA LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA NITRATOS | 205 |
| A2.3 | AJUSTE DE MINIMOS CUADRADOS PARA LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA SULFATOS | 207 |
| A3.1 | CURVA DE CALIBRACIÓN PARA CLORUROS | 214 |
| A3.2 | RESIDUOS PARA CLORUROS | 215 |
| A.3.3 | CURVA DE CALIBRACION CLORUROS PARA EL CALCULO DE LA EXACTITUD | 217 |
| A3.4 | CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL CALCULO DEL LIMITE DE DETECCIÓN PARA CLORUROS | 223 |

INTRODUCCIÓN

La captación de agua de lluvia es un medio fácil de obtener agua para consumo humano y/o uso agrícola. En muchos lugares del mundo con alta o media precipitación y en donde no se dispone de agua en cantidad y calidad necesaria para consumo humano, se recurre al agua de lluvia como fuente de abastecimiento. Al efecto, el agua de lluvia es interceptada, colectada y almacenada en depósitos para su posterior uso. En la captación del agua de lluvia con fines domésticos se acostumbra a utilizar la superficie del techo como captación, conociéndose a este modelo como SCAPT (sistema de captación de agua pluvial en techos). Este modelo tiene un beneficio adicional y es que además de su ubicación minimiza la contaminación del agua.

Sin embargo, a través del ciclo hidrológico, el agua se mueve en plantas y animales, ríos, lagos y océanos, evaporándose a la atmósfera y formando nubes que viajan empujadas por el viento, de tal suerte que si transportan contaminantes, éstos pueden alcanzar casi cualquier lugar sobre la superficie terrestre.

A este fenómeno debe añadirse el efecto de la contaminación atmosférica originada por las actividades industriales, domésticas y comerciales de modo que una lluvia "limpia" es imposible de despojar de partículas de polvo y contaminantes, lo que también conlleva a esperar un pH cercano al 5.6 (ligeramente ácido).

Al adicionarse SO_2 y NO_x el pH se torna dramáticamente ácido (por los ácidos sulfúrico y nítrico formados en la atmósfera).

La investigación a realizar consiste en la identificación de los contaminantes físico-químicos presentes en el agua lluvia que precipita en el Municipio de Nejapa en las cercanías del volcán de San Salvador. Una vez identificados, se ensayarán a nivel de laboratorio, métodos conocidos de separación de dichos contaminantes para proponer el método más adecuado que permita la efectiva remoción hasta concentraciones que estén dentro de los niveles permitidos por la norma de agua para consumo humano.

Esta investigación servirá como punto de referencia en el desarrollo de propuestas de tratamiento de agua lluvia en otras zonas del país.

CAPITULO I

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta la química atmosférica involucrada en el fenómeno de contaminación y su relación con la contaminación de las precipitaciones pluviales.

1.1 COMPOSICIÓN GENERAL DEL AIRE.

La Tierra está rodeada aproximadamente por 500,000 millones de toneladas de aire de las cuales 20.9% es oxígeno, 78.0% es nitrógeno y 0.9% es argón. Sin incluir el vapor de agua, estos gases forman el total, excepto un 0.4% de la atmósfera y tres cuartas partes del esto, que corresponden al dióxido de carbono. El 0.01 % contiene los demás gases nobles, hidrógeno, óxidos de nitrógeno, ozono y rastras de muchos otros gases.

La tabla 1.1 presenta un resumen de los gases principales y su concentración en el aire seco. Estas cifras permanecen esencialmente constantes mientras no se incluya el vapor de agua que tiene variaciones en volumen desde 35% a menos de 1%.

TABLA 1.1 COMPOSICIÓN DEL AIRE NATURAL

| COMPONENTE | CONCENTRACIÓN APROXIMADA % VOLUMEN |
|--|--|
| Nitrógeno (N ₂) | 78.03 |
| Oxígeno (O ₂) | 20.99 |
| Bióxido de Carbono (CO ₂) | 0.03 |
| Argón (A) | 0.94 |
| Neón (Ne) | 0.00123 |
| Helio (He) | 0.0004 |
| Criptón (Kr) | 0.00005 |
| Xenón (Xe) | 0.000006 |
| Hidrógeno (H ₂) | 0.01 |

| COMPONENTE | CONCENTRACIÓN APROXIMADA % VOLUMEN |
|----------------------------------|--|
| Metano (CH ₄) | 0.0002 |
| Óxido Nitroso (N ₂ O) | 0.00005 |
| Vapor de agua (H ₂ O) | Variable |
| Partículas | Variable en tipo y cantidad ¹ |
| Ozono (O ₃) | Variable ² |
| Formaldehído (HCHO) | Dudoso ³ |

Fuente : Wark, Kenneth, 2001

¹ Los tipos y concentraciones de estas sustancias pueden variar mucho de una región a otra y de un periodo a otro respecto a las condiciones naturales.

² Por las radiaciones ultravioleta y probablemente las tormentas, las concentraciones variarán de 0 a 0.07 ppm.

³ Procedente de fuentes biológicas o de la oxidación del metano; no se han determinado las posibles concentraciones.

El vapor de agua no se puede considerar normalmente como un contaminantes del aire aunque se produce en grandes cantidades en los procesos de combustión. La evaporación y precipitación naturales movilizan grandes cantidades de agua mucho mayores que cualquier proceso artificial.

El vapor de agua tiene un efecto sinérgico en los contaminantes del aire, haciendo que aumenten los daños que ocasionan. Por ejemplo, el dióxido de azufre (SO₂) que ya es en sí irritante y corrosivo, se combina con el vapor de agua y el oxígeno de la atmósfera para formar una llovizna de ácido sulfúrico extremadamente corrosiva.

El smog también depende del vapor de agua para su formación. La vigilancia de la contaminación en las zonas urbanas tiene que tener en cuenta la humedad y predecir su efecto en los contaminantes.

Antes de dar una definición de aire puro, es necesario conocer que la atmósfera es una envoltura gaseosa que rodea la tierra, mientras que el aire es una porción limitada de ella.

La atmósfera tiene una altura de 2,000 Km. La densidad de los gases desciende con la altitud y la temperatura varía también conforme esta, lo que permite separar arbitrariamente a la atmósfera en capas para su estudio.

El oxígeno es un componente activo de la atmósfera e interviene en los siguientes procesos:

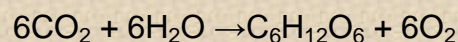
- Oxidación de hidratos de carbono
- Combustión
- Descomposición de materia orgánica

Existen algunos gases en la atmósfera que son esenciales para regular el oxígeno, como el metano y el dióxido de nitrógeno.

El vapor de agua se encuentra en las capas más bajas y decrece rápidamente desde la superficie hasta arriba, puesto que su fuente de producción es el proceso de la evaporación de los océanos, lagos, ríos, vegetación y con la condensación da como resultado la formación de nubes, nieblas, rocío, lluvia y nieve.

Dichos procesos se encuentran en forma balanceada en la atmósfera, por lo que podemos decir que la masa total de vapor de agua se mantiene constante.

Otro componente variable en la atmósfera es el CO₂ presente en muy pequeñas cantidades. Su producción natural es la vida animal principalmente de respiración, balanceada por la absorción de la vegetación.



En este aspecto el vapor de agua y el CO_2 no se consideran como contaminantes ;sino sólo cuando éste último sobrepasa la concentración aproximada de 0.03% V/V en la atmósfera, se considerará como contaminante.

1.2 FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Para que exista contaminación, se requiere que una sustancia definida se acumule hasta alcanzar concentraciones que excedan el nivel natural. Si la sustancia existe en la naturaleza, el origen de su acumulación puede ser las actividades del hombre; en este caso las sustancias se llaman antropogénicas.

Si no son actividades del hombre quienes las producen se dicen que son de origen natural, por ejemplo, erupciones volcánicas.

1.3 CLASIFICACION DE LOS CONTAMINANTES

Se define como contaminantes del aire a aquellas sustancias que no se consideran componentes naturales del mismo o cuya concentración ha sobrepasado su limite normal. Diversos autores han clasificado a los diferentes contaminantes atmosféricos de distintas maneras sin llegar a un acuerdo. Entre estas clasificaciones se tienen :

1. Por sus características físicas.
2. Por sus características químicas.
3. Por sus efectos.
4. Por sus fuentes de producción o emisión :

a. Partículas sólidas.(Macro partículas) .

Suelen tener diversos tamaños variando desde 20 a 30 micras de diámetro, hasta finas partículas suspendidas o aerosoles de valores tan bajos como 0.05 micras.

Entre los contaminantes sólidos se mencionan:

- ❑ Humos
- ❑ Hollín, cenizas provenientes de las combustiones.
- ❑ Polvo natural.
- ❑ Polvo de procesos industriales tales como : Fluoruros, óxidos de hierro, óxidos de aluminio, sulfuro, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos.

Clases de partículas sólidas :

Polvos sedimentables (Diámetro > 5 micras): Sílice, Berilio, Asbesto, Talco, Fibra vegetal.

Polvos en suspensión (Diámetro < 5 micras): Polvos orgánicos (polvo, polvillo de habitación, polvillo de fábricas de alimentos , Polvos inorgánicos (Plomo, Cromo Arsénico).

Entre los contaminantes más importantes se pueden mencionar : las celliskas de ácido sulfúrico formado por la oxidación del anhídrido sulfuroso que es la más importante.

b. Gases y vapores.

Entre ellos se tienen:

- ❑ Anhídrido sulfuroso (SO₂)
- ❑ Monóxido de carbono (CO)
- ❑ Dióxido de carbono (CO₂)
- ❑ Óxidos de nitrógeno (NOX)
- ❑ Hidrocarburos (HC)

Por sus fuentes de producción o de emisión:

- ❑ Contaminantes primarios
- ❑ Contaminantes secundarios

Las sustancias que se encuentran en la atmósfera tal como fueron emitidas se conocen como contaminantes primarios y a los que resultan de la interacción de los contaminantes primarios entre si “contaminantes secundarios”.

1.3.1 CONTAMINANTES PRIMARIOS

Como su nombre lo indica son sustancias que se encuentran en la atmósfera tal como fueron emitidas, entre ellos tenemos:

- ❑ Monóxido de carbono (CO)
- ❑ Bióxido de azufre (SO₂)
- ❑ Trióxido de azufre (SO₃)
- ❑ Dióxido de nitrógeno (NO₂)
- ❑ Monóxido de nitrógeno (NO)
- ❑ Hidrocarburos saturados y aromáticos.
- ❑ Macro partículas : sólidas, líquidas.
- ❑ Dióxido de carbono(CO₂)

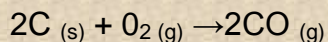
Cuando estos productos se liberan al aire no desaparecen sino que en realidad, producen una grave contaminación del aire, ya que, cuando se mezclan con la atmósfera, pueden integrarse a ella en forma semi permanente. Los problemas de la contaminación atmosférica se originan cuando estos contaminantes se acumulan en determinadas zonas geográficas.

Los gases y macro partículas producidas por la sociedad industrial que son liberados a la atmósfera, se conocen como contaminantes primarios del aire. Es conveniente recordar que algunos de estos compuestos son producidos también en cantidades apreciables por fuentes naturales y biológicas, entre ellas las volcánicas y geológicas.

1.3.1.1 MONÓXIDO DE CARBONO.

Es un contaminante gaseoso con un tiempo de vida medio muy corto, debido a que reacciona, después de su emisión, rápidamente con otras moléculas del aire. El monóxido de carbono es un contaminante nocivo, que en el cuerpo humano disminuye la absorción de oxígeno por las células rojas, afecta la percepción y la capacidad de concentración, disminuye los reflejos y, en casos extremos, puede causar inconciencia.

Es el producto del uso de combustibles fósiles. Se forma por la combustión incompleta del carbono o de sus compuestos.



En los vehículos con motores de combustión interna es común que se forme monóxido de carbono, este producto se acumula en las zonas urbanas, cerca de las vías rápidas y de las calles de gran movimiento y su concentración varía conforme aumenta o disminuye el tránsito. En forma natural, los volcanes y los incendios forestales desprenden CO. Las plantas producen cantidades mínimas como producto de la descomposición de las moléculas de clorofila.

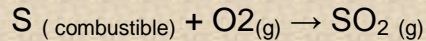
La mayoría de los contaminantes primarios se mantienen en el aire durante cierto período, pero, después se eliminan debido a reacciones químicas y bioquímicas.

La última región a la que llega un contaminante se conoce como depósito final. Por ejemplo, al parecer el monóxido de carbono se elimina del aire por acción de algunos microorganismos del suelo, por esto se dice que el destino o depósito final del monóxido de carbono es el suelo.

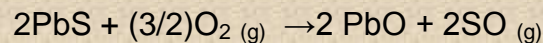
Es importante la existencia de un depósito final para un contaminante ya que, a falta de él, el contaminante se acumulará peligrosamente en la atmósfera.

1.3.1.2 OXIDOS DE AZUFRE (SOX).

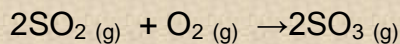
Se producen en la combustión del carbón y petróleo que contienen azufre (gasolina, gas propano, etc.).



El SO también se produce en la refinación de ciertos minerales al estado de sulfuros.



El SO₂ es el contaminante del aire derivado del azufre más importante, sin embargo, algunos procesos industriales emiten trióxido de azufre SO₃, el cual se forma en la atmósfera en pequeñas cantidades debido a la reacción entre el SO₂ y el oxígeno.



Algunas macro partículas del aire catalizan esta reacción. A veces el SO₂ y el SO₃ se mencionan en forma conjunta como monóxido de azufre (SOX), los cuales se combinan rápidamente con el vapor de agua para formar lloviznas de ácido sulfúrico y de esta forma terminan depositándose sobre la tierra o el mar, ya sea con la precipitación pluvial o sedimentándose en forma de partículas.

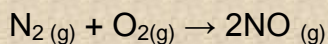
El anhídrido sulfuroso es un gas tóxico, y es letal en una concentración suficientemente alta. En periodos largos, aun en bajas concentraciones es dañino a la salud y a muchas plantas, causando deterioro a los trabajos de pintura y piedra de edificios.

1.3.1.3 OXIDOS DE NITRÓGENO (NOX).

Son emitidos principalmente por los vehículos. Dentro de este grupo de contaminantes gaseosos el dióxido de nitrógeno es el componente más importante por su agresividad química, contribuye a la formación del smog fotoquímico.

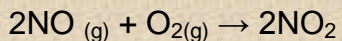
El monóxido (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) son contaminantes primarios del aire. El NO, también llamado óxido nítrico es un gas incoloro e inodoro, en tanto que el NO₂ es una gas de color rojizo, de olor fuerte y asfixiante parecido al del cloro.

El óxido nítrico se forma en el aire mediante la reacción del oxígeno con el nitrógeno.



Esta reacción ocurre a altas temperaturas durante el uso de combustibles fósiles (temperatura de llama).

El NO₂ se forma por reacción del NO con el O₂ del aire.



Los óxidos de nitrógeno participan en la formación de contaminantes secundarios del aire. Lo que tiende a eliminar una pequeña porción de la atmósfera. La mayoría de los NOX se convierten finalmente en ácido nítrico (HNO₃) y nitratos (NO₃⁻).

En esta forma se depositan sobre la tierra o en el mar como consecuencia de las lluvias o se sedimentan como macro partículas. Por tanto la tierra y el mar son el

depósito final de óxidos de nitrógeno, una vez que estos se han convertido en nitratos.

1.3.1.4 HIDROCARBUROS (HC).

Se consideran como contaminantes primarios y actualmente, tienen importancia por la gran cantidad de fuentes y el volumen de sus emisiones al aire. Estos entran al aire por evaporación de los productos combustibles fósiles, como la gasolina.

Los hidrocarburos no se queman totalmente durante la combustión de la gasolina, el petróleo, el carbón y la madera, también a la atmósfera. Los vehículos son la principal fuente de hidrocarburos. Sin duda su mayor producción se debe a las actividades de la industria petrolera. los automóviles los emiten por evaporación del combustible y, en forma de hidrocarburos no quemados a través del tubo de escape.

Algunos radicales libres (activados por el ozono) de los hidrocarburos reaccionan con el NO₂.

1.3.1.5 MACROPARTICULAS.

Además de los contaminantes gaseosos, el aire puede tener partículas sólidas y líquidas suspendidas y dispersas. A ellas se debe el aspecto nebuloso y brumoso del aire contaminado.

Las partículas se estudian de acuerdo a su tamaño, el cual su vez esta relacionado con su capacidad de sedimentar. Se producen junto con los contaminantes gaseosos del aire, debido a diferentes actividades. Los principales emisores industriales son la fabricación de hierro y acero, el almacenamiento y la manipulación de granos y la elaboración de pulpa y papel.

1.3.1.6 PARTICULAS LIQUIDAS

Se encuentran presentes como suspensiones coloidales en las que la fase dispersante, en este caso es el aire, es gaseosa, la fase dispersada es un liquido, y constituyen lo que se conoce como aerosoles, los que se manifiestan en forma de vapores, niebla o vahos.

Las pequeñas gotitas pueden tener diversos tamaños, lo que determina su velocidad de precipitación, por lo general alcanzan 10 micras de diámetro. También tiene importancia la carga eléctrica de la capa monomolecular que sirve de cubierta a estas pequeñas esferas líquidas.

Estas gotas pueden absorber moléculas de gases tóxicos como anhídrido sulfuroso y los óxidos de nitrógeno, con lo que una neblina inofensiva se puede transformar en un agente letal.

1.3.2 CONTAMINANTES SECUNDARIOS

Una vez que los contaminantes primarios han quedado atrapados en las capas inferiores de la atmósfera, las condiciones de humedad y temperatura propician que reaccionen entre si con los componentes normales de la atmósfera.

Estas reacciones requieren de la energía de la luz solar por lo que se llaman reacciones fotoquímicas. A los productos resultantes de ellas se les llama contaminantes secundarios y al neblumo que se produce se le llama Neblumo Fotoquímico.

El resultado final de las reacciones fotoquímicas entre los contaminantes atmosféricos es la formación de una mezcla compleja de productos orgánicos e inorgánicos cuya composición específica variará en cada caso.

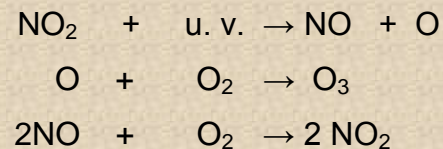
De esta manera, la formación de contaminantes secundarios eliminan de la atmósfera a los contaminantes primarios pero, como es muy frecuente cuando el ambiente es alterado por la acción del hombre, los productos de la reacción son más nocivos para la vida que los contaminantes originales.

1.3.3 QUÍMICA ATMOSFERICA.

En la atmósfera tienen lugar innumerables reacciones químicas, sin embargo al tratar el tema de la contaminación de la lluvia, son de interés solo unas cuantas. Las reacciones más importantes que se han postulado y que a través del tiempo se han aceptado en la química atmosférica son :

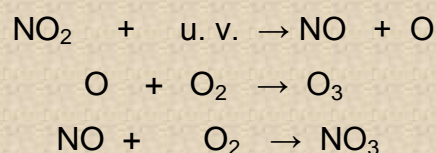
1.3.3.1 OZONO

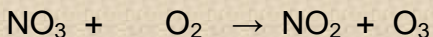
a) Formación del Ozono



El dióxido de nitrógeno, que actúa en cierta forma como catalizador, se regenera al final pero produce una concentración cada vez mayor de ozono, gas altamente oxidante, en este caso el NO_2 es producto del ozono, aunque en condiciones normales (0.02 mg/L), se considera como regulador del ozono atmosférico.

b) La reacción anterior puede desarrollarse también así :





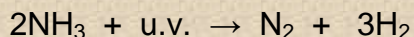
Otra vez se regenera el dióxido de nitrógeno original, con formación de más ozono.

1.3.3.2 COMPUESTOS NITROGENADOS

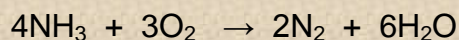
Los óxidos importantes de nitrógeno que se encuentran en el aire como contaminantes son el óxido de nitrógeno, NO, dióxido de nitrógeno, NO₂, y en menor escala el ión amonio, NH₄⁺.

Los primeros dos son producidos por cualquier proceso de combustión que tenga lugar en el aire, lo que es el caso de la mayoría de las oxidaciones de nitrógeno atmosférico que se efectúan a las temperaturas de llama.

El amoníaco, NH₃; que pueda estar presente en la atmósfera muy raramente puede llegar a formar ácido nítrico, pues el NH₃ experimenta una fotólisis:

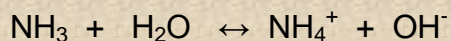


El amoníaco que se genera en los basureros, y que es incinerado, puede reaccionar con el oxígeno, liberando nitrógeno:



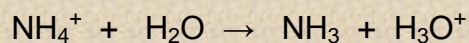
Esta reacción evita que el NH₃ llegue a formar acidez en la lluvia.

Una propiedad que tiene el amoníaco es que se ioniza con facilidad en estado acuoso:

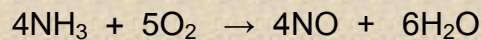


Este equilibrio es afectado por la alta reactividad del ión OH^- , dejando libre el ión amonio (NH_4^+).

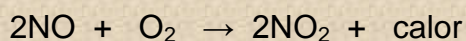
Según lo anterior el ión amonio procedente de la ionización del amoniaco puede producir una débil acidez debido a la hidrólisis del ión amonio.



La reacción siguiente, necesita una gran energía de activación, pero puede ser catalizada por la radiación ultravioleta.

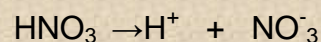


a partir de la reacción anterior :



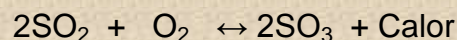
esta reacción es mucho más factible, dado que la generación de CO_2 es exotérmica y se verá favorecida a menor temperatura.

El ácido nítrico tiene una gran capacidad de ionización por lo que en medio acuoso se ioniza así en medio acuoso :



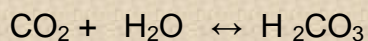
1.3.3.3 COMPUESTOS AZUFRADOS

En la atmósfera se cuenta con el bióxido de azufre ya que es un contaminante primario, el que puede reaccionar así:



1.3.3.4 COMPUESTOS CARBONADOS

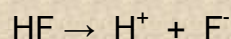
De estos compuestos existen muchos en la atmósfera, pero el interés se basa en el CO₂, pues los demás no representan influencia marcada en la acidez de la lluvia.



El Dióxido de carbono (CO₂) reacciona con agua para formar ácido carbónico.

1.3.4 COMPUESTOS HALOGENADOS

Entre estos los principales son el ácido fluorhídrico (HF) y el ácido clorhídrico (HCl). El ácido fluorhídrico puede atacar ciertos materiales que no atacan otros ácidos, como el vidrio; además puede causar graves daños a la vegetación.



Este ácido es producido en algunos procesos industriales y metalúrgicos.

Estos compuestos provienen de las fábricas de aluminio, pues la criolita (F₆AlNa₃) fundida, se utiliza como disolvente en la preparación electrolítica del aluminio, fábricas de abonos fosfatados, pues la apatita (Ca₅F(PO₄)₃), es una fuente de compuestos fosforados que se utilizan en esta industria, también las fábricas de acero, pues ocupan espato fluor (F₂Ca), el cual es un fundente.

Las fabricas de cerámica y las ladrilleras también contribuyen, ya que el calor que sus procesos generan pueden liberarlo.

1.4 EFECTOS METEREOLÓGICOS

INTRODUCCIÓN

Todos los contaminantes del aire emitidos por fuentes puntuales y distribuidas son transportados, dispersos, o concentrados por condiciones meteorológicas y topográficas. El ciclo de estancia aérea se inicia con la emisión de los contaminantes, seguido por su transporte y difusión en la atmósfera. El ciclo se completa cuando los contaminantes se depositan sobre la vegetación, el ganado, las superficies del suelo y del agua, y otros objetos, cuando son arrastrados de la atmósfera por la lluvia, o cuando se escapan al espacio. En algunos casos, los contaminantes se pueden volver a introducir en la atmósfera por la acción del viento.

1.4.1 TRANSPORTE A LARGA DISTANCIA.

Como ya se dijo, la atmósfera se considera estructurada para fines prácticos, en capas concéntricas que se distinguen una de otra por los cambios de temperatura que ocurren en ellas en relación con la altitud.

En la atmósfera los vientos son predominantes de Este a Oeste, pero no tienen movilidad vertical; por lo tanto, se caracterizan por una extrema estabilidad en esa dirección.

Por esta razón, es factible que los contaminantes que lleguen a ella se repartan en pocas semanas en una franja angosta, situada a lo largo de la latitud de origen. Después, esta banda se dispersará en el hemisferio de origen en dirección norte-sur, finalmente abarcará todo el mundo.

La fracción de contaminante que llegue a bajar a la Troposfera pasará, con relativa rapidez, a la superficie terrestre promedio de las lluvias o turbulencia de las masas de aire.

Así, la Estratosfera puede considerarse como una región atmosférica “estancada” y por eso, puede acumular por largo tiempo, los contaminantes que lleguen a ella. Se considera que el tiempo medio de residencia en la Estratosfera de una sustancia o sea, el tiempo para que la mitad de un contaminante regrese a la Troposfera, es de dos años. Esto hace que la contaminación de la Estratosfera sea un problema de gran riesgo para el mundo entero.

1.4.2. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

La meteorología está involucrada con problemas de contaminación del aire, porque lleva a un entendimiento del proceso de la dispersión y en algunos casos, pueden realizarse estimaciones de la concentración de los contaminantes. El gas afluente se diluye con el aire y se dispersa. La concentración se reduce debido a la mezcla con un volumen mayor de aire.

Dentro de los factores meteorológicos que influyen en la dispersión de los contaminantes tenemos : el viento y la turbulencia.

1.4.3 EL VIENTO

Es el principal factor, un contaminante gaseoso tomará exactamente el movimiento del aire que lo contiene, cuanto más fuerte sea el viento, mayor será la dilución. El viento es el componente atmosférico que genera los procesos dinámicos de transporte del aire en direcciones diversas, permitiendo la mezcla de sus componentes en un área en particular.

El viento interviene de modo directo en las etapas de transporte y difusión del contaminante dispersándolo a escala internacional.

1.4.4. LA TURBULENCIA

En realidad la velocidad del viento varía en una secuencia irregular de ráfagas y calmas, haciendo en su trayectoria, movimientos irregulares en dirección horizontal y vertical en la atmósfera. Ambas son manifestaciones del fenómeno de turbulencia. Su efecto es dispersar el contaminante en una región aproximadamente cónica varias veces mayor en volumen, reduciendo la concentración del contaminante.

La dispersión de un contaminante dependerá de la intensidad de la turbulencia, siendo mayor su dispersión cuando mayor sea la turbulencia. Esta es producto de la convección del aire y que genera los vientos, pues cuando se juntan masas de aire de muy diferentes temperaturas se generan turbulencias muy violentas que algunas veces son llamados tornados.

1.4.5. EFECTOS TOPOGRÁFICOS

Las montañas y valles pueden causar atrapamientos de aire en las primeras horas del día, ya que el aire junto a las montañas, está más frío que el de los valles por lo que inicia un descenso, impidiendo que el aire de los valles se eleve y evitando la dispersión de los contaminantes.

1.4.6. PRECIPITACIONES

Si la humedad de la atmósfera lo permite, los contaminantes se adhieren a las partículas líquidas, favoreciendo la formación de nieblas. La cual se conoce como brumado neblumo. Las formaciones de neblumo fotoquímico se debe a la reacción química que se da entre los contaminantes primarios y éstos se mezclan

con la humedad bajo condiciones de temperatura favorables, o catalizados por los rayos solares (fotoquímicas), dando como resultado los llamados contaminantes secundarios.

1.5 PROCESOS DE LA CONTAMINACION DEL AGUA LLUVIA

La composición química del agua de lluvia ha recibido considerable atención durante los últimos veinte años, particularmente en áreas con altos niveles de contaminación atmosférica. En las áreas urbanas el agua de lluvia es influenciada por fuentes naturales y antropogénicas. Polvos y partículas provenientes de suelos erosionados, de campos de cultivo, de áreas no pavimentadas y carentes de vegetación, así como la emisión de contaminantes asociados con la quema de combustibles fósiles que consumen los vehículos automotores, las industrias, los comercios y servicios, originan la formación de compuestos ácidos que contribuyen a modificar significativamente la composición natural del agua de lluvia.

El agua de lluvia por naturaleza es ligeramente ácida, causada por la formación de ácido carbónico, cuando la humedad atmosférica alcanza su equilibrio con el dióxido de carbono presente en el ambiente. En áreas remotas del mundo el valor promedio de pH del agua de lluvia es de 4.9, con episodios de pH 4.0 - 6.0. Tales mediciones asociadas al ciclo natural del azufre sugieren que en ausencia de la actividad humana y las emisiones naturales de polvo alcalino, ácidos orgánicos y nitrógeno influyen en la acidez natural (pH) del agua de lluvia, por lo que en estudios recientes los investigadores han considerado un valor de 5.0 como el pH natural del agua de lluvia, denominando las lluvias ácidas cuando el pH es inferior al valor de 5.0. (Irwin y Williams, 1988; NAPAP, 1990).

La formación de precipitación ácida en la atmósfera se asocia con procesos de transformación química (figura 1.1), en donde participan los precursores óxidos de

azufre y de nitrógeno, provenientes de fuentes naturales y antropogénicas ,originando ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), principalmente.

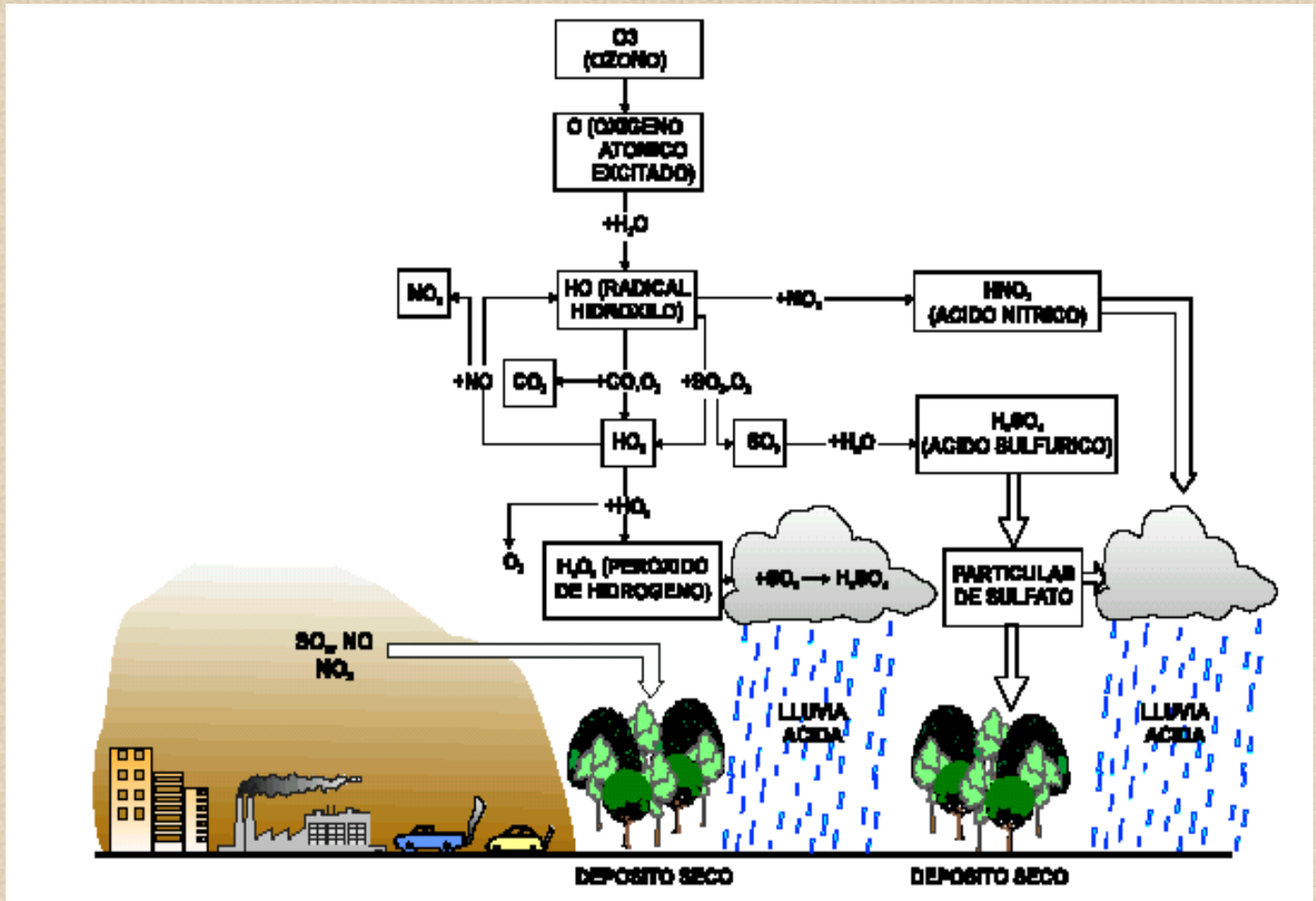


FIGURA 1.1 MECANISMOS DE TRANSFORMACION QUIMICA

La lluvia ácida será aquella que presente un pH menor de 5.6 (considerado limite de acidez normal) producto de la formación de ácidos inorgánicos provenientes de la contaminación atmosférica.

De una manera natural, el dióxido de carbono, al disolverse en el agua de la atmósfera, produce una solución ligeramente ácida que disuelve con facilidad algunos minerales. Sin embargo esta acidez natural de la lluvia es muy baja en relación con la que imparten actualmente los ácidos fuertes como el sulfúrico y el

nítrico, sobre todo a la lluvia que se origina cerca de las zonas muy industrializadas.

Se cree que estos ácidos se forman a partir de los contaminantes primarios como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno.

La oxidación adicional de los óxidos de azufre y nitrógeno puede ser catalizada por los contaminantes atmosféricos, incluyendo las partículas sólidas y por la luz solar. Una vez formados los SO_3 y NO_2 , reaccionan con facilidad con la humedad atmosférica para formar los ácidos sulfúrico y nítrico (figura 1.2).

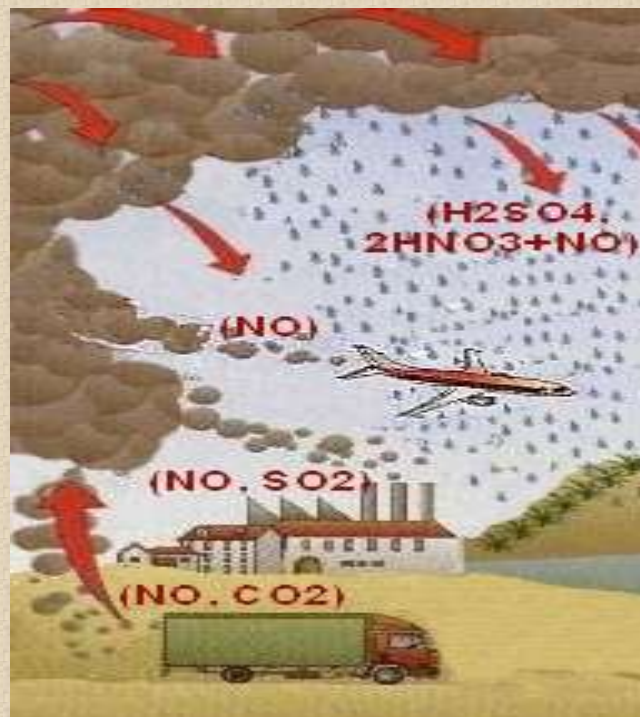


FIGURA 1.2 MECANISMOS DE FORMACIÓN DE SO_3 y NO_2

Fuente : elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

Estos permanecen disociados en la atmósfera y le imparten características ácidas y eventualmente se precipitan con la neblina, la lluvia o la nieve, los que por lo tanto tendrán mayor acidez en las áreas que reciben continuamente dichos óxidos que en los que están alterados.

1.6 CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA EN EL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR

Actualmente no se cuenta con un estudio específico de la calidad del aire en la zona de estudio, ni en el Municipio de Nejapa. Sin embargo, el monitoreo de la calidad del aire en cinco puntos del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) por espacio de 4 años (1997-2000) por Swiscontact (18), es indicativo de la situación más general.

El análisis de dichos datos supone que las emisiones gaseosas provienen fundamentalmente de fuentes móviles.

Según la media anual planteada en la información, los contaminantes analizados para la ciudad de San Salvador para los años 1997, 1998, 1999 y 2000 muestran una tendencia irregular y algunos valores sobrepasan los establecidos por OMS/EPA .

Específicamente, las partículas suspendidas y las partículas con diámetro mayor a 10 micras (PM10) presentan valores de $103.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, siendo el parámetro de OMS/EPA (Tablas 1.2 y 1.3) de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de 50 a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM10.

TABLA 1.2 LIMITE DE CONCENTRACION DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS ESTABLECIDOS POR OMS Y EPA .

| CONTAMINANTE | TIEMPO PROMEDIO | OMS, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | EPA, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Dióxido de Sulfuro | 24 horas | 70 | 80 |
| | | 125 | 365 |
| Monóxido de Carbono | 8 horas | 10,000 | 10,000 - |
| | 1 hora | 30,000 | 40,000 |
| Ozono | 1 hora | 150-200 | 240 |
| Plomo | 3 meses | 1.5 | 1.5 |
| Total de Partículas suspendidas | Media anual | 100 | 75 |

| CONTAMINANTE | TIEMPO PROMEDIO | OMS, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | EPA, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|---|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| PM-10 | Media anual 24 horas | No aplicable | 50 150 |
| Partículas depositadas | 30 días | 500 | No aplicable |
| Hidrocarburos no saturados y aromáticos | 3 horas | 160 | 160 |

Fuente : elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) para el programa Salvadoreño de Investigación Sobre Desarrollo y Medio Ambiente (PRISMA) "Proyecto de Prevención y Mitigación de La contaminación Municipal e Industrial en el Area del Gran San Salvador"

TABLA 1.3 TENDENCIA IRREGULAR DE CONTAMINANTES EN LA ZONA URBANA

| Indicador | 1997 | | 1998 | | 1999 | | 2000 | |
|-----------------|---|---------------------------------------|---|---------------------------------------|---|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| | Centro Urbano $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Zona Res. $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Centro Urbano $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Zona Res. $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Centro Urbano $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Zona Res. $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Centro Urbano $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Zona Res. $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| OZONO | ND | 58 | 67 | 46.4 | ND | 62 | ND | 25.83 |
| NO ₂ | 38 | 29.3 | 33.2 | 28.07 | 39 | 29 | 45.09 | 33.40 |
| PTS | ND | 96.7 | 95.3 | 82.1 | ND | 102 | ND | 103.35 |
| PM10 | 58 | 43.09 | 60 | 49.9 | 64 | 50 | 50 | 32.35 |
| PLOMO | ND | 0.0113 | 0.014 | 0.013 | NDISP | NDISP | 0.0167 | NDISP |

Fuente : (16).

PTS : Partículas suspendidas

PM10 : Partículas con diámetro de partícula de 10 micras

NDISP : No disponible

Res : Residencial

Las unidades terrestres de transporte mediante las emisiones vehiculares (carros, camiones, buses, etc.) y los vapores desprendidos de los tanques de combustible son la mayor fuente de contaminación del aire en Centro América (AID, 1995), siendo ello consistente con el incremento del parque vehicular, el mayor consumo de gasolina durante la última década, y por tanto por los niveles crecientes de contaminación del aire en el país.

La causa principal de la contaminación del aire es la combustión. A partir de las impurezas del combustible, de una incorrecta relación entre combustible y aire, o temperaturas de combustión demasiado altas o bajas son causa de la formación de productos secundarios, tales como monóxido de carbono, óxido de azufre, óxido de nitrógeno, ozono, partículas, plomo, cenizas finas e hidrocarburos no quemados.

En el monitoreo de la calidad del aire que se realizó en San Salvador los parámetros que se midieron fueron : óxidos de nitrógeno, ozono, PM10, Pb en PM10, PH, polvos solubles e insolubles, además de Benceno, Tolueno y Xileno, como contaminantes atmosféricos (18).

El transporte privado incluye a los automóviles, motocicletas, pick-ups, camiones, microbuses quienes son los que mayor grado de contaminación generan debido a las altas concentraciones de monóxido de carbono e hidrocarburos que son emitidas por los vehículos particulares; mientras que los óxidos de nitrógeno por los camiones motor diesel y los pick ups que introducen trampas de hollín convirtiéndose en los mayores emisores de material particulado.

Los resultados de un muestreo de Junio de 1997 reflejaron que el 80% de los vehículos contaminaban el aire por sobrepasar los niveles mínimos de contaminación (6).

Una investigación conjunta entre Pro-Eco y FUSADES realizada en el Área Metropolitana de San Salvador muestra algunos datos de contaminación en varios

de los puntos estudiados, a excepción del caso del plomo debido a que para la fecha de recolección de los datos (diciembre de 1996) únicamente se estaba consumiendo gasolina sin plomo (16). Los datos se presentan a continuación.

TABLA 1.4 AMSS: NINELES DE CONTAMINACIÓN EN ZONAS ESPECIFICAS
(Diciembre de 1996) ($\mu\text{g/litro}$)

| Zona | Dióxido de nitrógeno | Ozono | Material Particulado | Plomo |
|------------------------------|----------------------|-------|----------------------|---------|
| Autocam | 40.50 | 60.36 | 14.38 | N.DISP. |
| Supermercado El Sol | 59.28 | 63.60 | 25.71 | 0.01 |
| Hospital de Maternidad | 57.77 | 62.53 | 115.25 | 0.03 |
| Supermercado Selectos centro | 71.35 | 44.38 | 40.40 | N.DISP. |
| Sagrisa | 70.16 | 58.51 | 48.64 | 0.03 |
| Soyapango | 64.93 | 70.45 | 100.84 | 0.08 |
| Apopa | 56.46 | 63.23 | 29.04 | 0.04 |
| Santa Tecla | 61.01 | 63.60 | 85.29 | 0.02 |
| Promedio | 60.18 | 60.83 | 57.44 | 0.03 |
| Limite Permisible | 100.00 | 60.00 | 50.00 | 1.00 |

Fuente : Informe Anual dela Calidad del Aire en El Salvador, FUSADES/ProEco, febrero de1997.

1.7 CONTAMINACIÓN DEL AGUA LLUVIA EN EL AMSS

Los estudios realizados sobre el fenómeno de la contaminación del agua lluvia se han limitado ha realizar el monitoreo y medición de la concentración de los contaminantes de las precipitaciones del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) con respecto al tiempo durante la época lluviosa, restringiendo la investigación a presentar resultados obtenidos de los análisis físico químicos (15).

Un estudio preliminar sobre las causas de la lluvia ácida en el (AMSS) y alrededores (15) realizado en el período de 1991 concluyó que, en forma general, la lluvia presentaba un pH promedio de 5.63 con máximos y mínimos de 5.9 y 4.15 respectivamente. Por otro lado, se propuso que las causas principales del aumento de la acidez del agua lluvia fueron las emanaciones industriales y de vehículos automotores.

En otro estudio sobre el monitoreo de la calidad del aire en cinco puntos del (AMSS) por espacio de 4 años (1997-2000). Produjo resultados que suponen que las emisiones gaseosas provienen fundamentalmente de fuentes móviles (16).

1.7.1 LA LLUVIA ACIDA EN EL AMSS

Según Pérez Echegoyen (1), el pH promedio del agua lluvia se reportó de 5.63 (no muy grave según (1)). Aclaran que en forma local en varios puntos del AMSS y alrededores, se reportaron pHs bajos, hasta 4.15, por lo que para 1991 las lluvias ácidas en San Salvador, ocasionalmente estaban precipitando.

El estudio concluye que la zona industrial de Soyapango resultó ser la de mayor acidez en la lluvia de San Salvador.(pH = 4.15).

La zona de mayor contaminación con CO₂ en el agua lluvia fue Ciudad Merliot con 3.12 mg/L (dato promedio local) y el dato promedio anual de 2.64 mg/L. También reportan que la Ciudad de Soyapango presentó el mayor contenido de nitratos con 0.697 mg/L y el valor promedio anual del AMSS de 0.57 mg/L.

CAPITULO II

EFFECTOS A LA SALUD POR EL CONSUMO DE AGUA LLUVIA

2.1 RIESGOS QUÍMICOS RELACIONADOS CON EL AGUA DE CONSUMO

El hombre puede estar expuesto durante la mayor parte de su vida a niveles bajos de una amplia variedad de sustancias químicas ambientales. Por lo común, el grado de exposición es insuficiente para producir signos manifiestos de toxicidad y por esa razón no es posible, en la mayoría de los casos, establecer claramente las relaciones de causa efecto.

Por otra parte, la exposición simultánea a varias sustancias químicas a través de los diferentes elementos del ambiente, hace más difícil la evaluación del grado de peligrosidad vinculado a una sola de ellas.

Algunos contaminantes químicos, si exceden de cierta concentración pueden constituir un riesgo tóxico directo cuando se ingieren con el agua, tal es el caso, por ejemplo de los nitratos, el arsénico y el plomo.

Otros componentes del agua potable como fluoruros, resultan beneficiosos a la salud, aunque puedan afectarla al variar sus concentraciones en este medio (por exceso o defecto).

Para evitar las consecuencias que pueda tener la contaminación química de las aguas de consumo sobre la salud humana se han establecido los llamados “valores guía o normas de potabilidad”, cuyo propósito es definir un tipo de agua de calidad tal que pueda ser consumida por todas las personas durante toda su vida.

En nuestro país, tanto en el área urbana como en la rural, con cualquier sistema de abastecimiento que se use, en lo relativo a la prevención y control de la contaminación de las aguas, deberá tomarse en cuenta la “ Norma Salvadoreña

Obligatoria”(NSO #01ES/2000). Todas las empresas o instituciones públicas y privadas cuya función sea abastecer o comercializar el agua, tienen la obligación de respetarla. El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS) es la institución encargada de la vigilancia del cumplimiento de esta Norma.

2.2 EFECTOS EN LA SALUD POR CONSUMO DE AGUA CONTAMINADA POR AGENTES QUÍMICOS

2.2.1 DUREZA DEL AGUA

Diferentes investigadores han destacado una relación estadística inversa entre la dureza del agua de consumo y la tasa de mortalidad por enfermedades cardiovasculares. Las zonas abastecidas con aguas blandas presentan casi en forma sistemática una prevalencia significativamente más elevada de cardiopatías arterioscleróticas o de enfermedades degenerativas del corazón, hipertensión y muerte repentina de origen cardiovascular o por una combinación de esas afecciones.

2.2.2 NITRITOS Y NITRATOS

Cantidades elevadas de nitrato pueden causar una enfermedad llamada metahemoglobinemia o cianosis de los nitratos en los infantes, especialmente en aquellos que se les da leche preparada, debido a que los jugos gástricos de los recién nacidos son neutros en vez de ácidos, los nitratos se reducen a nitritos. La absorción de los nitritos por la corriente sanguínea y su combinación con la hemoglobina, que no es un portador de oxígeno, priva a los organismos y tejidos de este elemento vital; la cianosis (una coloración azul de la piel) es el síntoma de envenenamiento.

Además, los nitratos podrían ser causantes, junto con otras sustancias, de la producción del bocio. Los nitratos pueden ser reducidos a nitritos por la microflora intestinal, sobretodo en los lactantes pequeños; en adultos normales los nitratos absorbidos se excretan rápidamente por el riñón

2.2.3 SULFATOS

Los sulfatos actúan sobre el equilibrio ácido - básico por alterar el tenor de calcio y fósforo normales en suero, se atenúa con la presencia de calcio en agua.

Tienen efecto laxante y afectan la absorción de calcio, provocando inconvenientes en la formación de hemoglobina con la consiguiente anemia, se observa también decoloración del pelo.

2.2.4 METALES PESADOS

Los metales pesados son tóxicos por ser biorrefractarios y bioacumulativos. Cuando se arranca desde los niveles tróficos más bajos y alcanza a los superiores o el hombre, el metal ha podido concentrarse incluso varios miles de veces. A continuación se resumen los efectos a la salud que pueden provocar ciertos metales pesados en el agua de consumo.

TABLA 2.1 EFECTOS A LA SALUD POR METALES PESADOS EN AGUA DE CONSUMO

| METAL | EFECTO |
|--------|---|
| CADMIO | La ingesta con una proporción superior a 5 mg/L da lugar a una acumulación en el córtex renal en forma de metalotioneina que dará lugar a trastornos renales, alteraciones óseas e hipertensión. Su presencia en el agua no parece asociarse con alteraciones de ese ecosistema (1mg/L) pero puede acumularse en moluscos y peces si se supera ese nivel, generándose así otra vía por miedo de estos alimentos, de intoxicación para la especie humana. |

| METAL | EFECTO |
|-------|---|
| CROMO | <p>La forma hexavalente es muy tóxica, dando lugar a hepato y nefropatías e incluso a cánceres. Sin embargo el cromo trivalente junto al Ácido Nicotínico y a aminoácidos de la dieta, forman el GTF (Glucose Tolerance Factor) que potencia la insulina y por otra parte protegiendo de la diabetes y parece que también de aterosclerosis.</p> |
| PLOMO | <p>La intoxicación debida a la ingesta de agua contaminada, se va a expresar con cólico entérico y constipación, así como náuseas y vómitos.</p> <p>Hay también afectación hematológica y hepática, mostrándose palidez y pigmentaciones mucosas, cuando la exposición es crónica. En el caso de los niños puede aparecer encefalopatía saturnina y fijaciones óseas, por lo que a pesar de que el 90% del plomo ingerido acaba eliminándose a través de heces y orina, la legislación está reduciendo el límite de tolerancia en estas últimas fechas.</p> |

CAPITULO III

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

INTRODUCCIÓN

San Jerónimo Los Planes es un cantón situado sobre la parte alta del volcán de San Salvador , consta de los siguientes caseríos :

- ❑ San Jerónimo Los Planes
- ❑ Los Mejía
- ❑ Crescencio
- ❑ El Boquerón
- ❑ Los Quintanilla
- ❑ Santa Isabel
- ❑ Santa Rosa
- ❑ Santa Lucía
- ❑ El Ciprés
- ❑ San Francisco

3.1 ASPECTO FÍSICO

La zona se caracteriza por la presencia de bosque primario y cafetales extensos sobre tierra pedregosa superficial desde ondulada a montañosa muy accidentada . Los caminos son de tierra y en algunos casos existen calles principales adoquinadas.

En muchos caminos se observa la presencia de lava basáltica y materiales piroclásticos.

3.2 FLORA

La flora está constituida por bosque húmedo subtropical y bosque muy húmedo subtropical. Las especies arbóreas más notables son : papaturro, conacaste, morro, roble, chaparro, nance, capulín de monte, ojushte, zopilocuayo y níspero.



FIG 3.1 ASPECTO FÍSICO PREDOMINANTE EN LA ZONA DE ESTUDIO



FIG 3.2 CAMINO RURAL DEL CANTÓN SAN JERÓNIMO LOS PLANES

3.3 CLIMA

En su mayor parte el clima es templado, presentando una temperatura más agradable al Sur, propio del tipo de tierra templada. El monto pluvial anual oscila entre 1800 y 2000 mm.

3.4 CENSO POBLACIONAL

El porcentaje de analfabetismo es de 20%. Dos escuelas ubicadas fuera del cantón sirven educación básica. El 70% de la población se dedica a la agricultura, 20% al comercio.

3.5 ESTRUCTURA FÍSICA.

El 80% de las casas poseen techos de lámina, el resto, techo de teja. Las paredes de las viviendas son en su mayoría de adobe o sistema mixto. Una carretera pavimentada que comunica con las ciudades de San Salvador, Apopa y Quezaltepeque atraviesa el cantón de Noroeste a Suroeste.

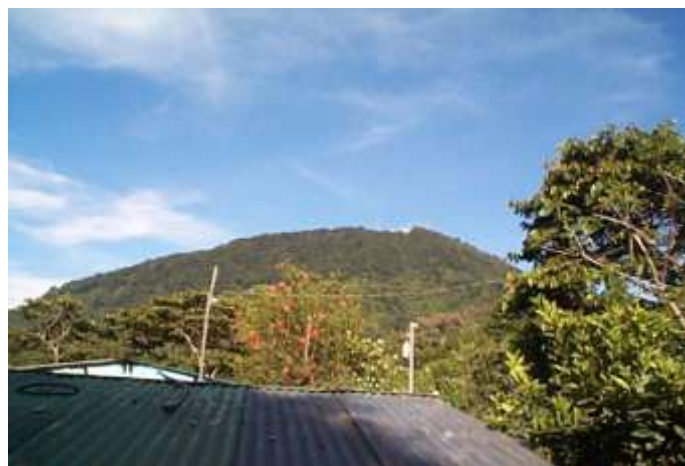


FIG. 3.3 TECHO DE VIVIENDA UBICADA EN EL CANTÓN SAN JERÓNIMO LOS PLANES, NEJAPA. AL FONDO PUEDE VERSE “EL PICACHO”



FIG 3.4 PAREDES DE VIVIENDAS. EN PRIMER PLANO SE OBSERVA UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO

3.6 ABASTECIMIENTO DE AGUA Y SANEAMIENTO.

Las comunidades que se han asentado en las zonas altas del volcán de San Salvador sufren a diario el problema de escasez de agua potable; esto debido a la ubicación geográfica, la ausencia de red pública de suministro de agua potable y la carencia de recursos hídricos superficiales así como subterráneos; lo que hace que el agua lluvia sea la única fuente de agua que tengan a su disposición.

El agua lluvia que cae sobre los techos de las viviendas es recogida por canaletas que llevan el agua a pilas que se encuentran cerca de las viviendas, o hacia tanques de almacenamiento.

Además estas comunidades poseen tanques comunales de gran capacidad donde almacenan agua lluvia con la cual se abastecen en el invierno así como en verano.



FIG. 3.5 TRANSPORTE DE AGUA LLUVIA COLECTADA
HACIA UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO



FIG 3.6 RECEPCIÓN DE AGUA LLUVIA EN UN TANQUE DE
ALMACENAMIENTO.

3.6.1 USOS DEL AGUA EN EL CANTÓN SAN JERÓNIMO LOS PLANES.

Según la Dirección General de Salud del MSPAS, el total de familias utilizan agua lluvia almacenada en tanques, en su mayoría sin protección al ambiente, (tabla 3.1.)

TABLA 3.1 USOS DE AGUA

| | | |
|---|------------------|-----|
| No de Viviendas | | 200 |
| No de habitantes | | 352 |
| Casas con uso de agua lluvia | | 200 |
| Pozos | Protegidos | 101 |
| | No protegidos | 126 |
| | Con bomba | -- |
| Ríos | | -- |
| Cañerías | | -- |
| Otros | | -- |
| Casas con Distancia a las fuentes de agua | Menos de 300 mts | 98 |
| | Mas de 300 mts | 102 |
| Potabilización | Si tiene | 135 |
| | No tiene | 65 |
| Tratamiento del agua | Puriagua | -- |
| | Cloro | 74 |
| | Hervirla | 51 |
| | Otros | 10 |

Fuente : Dirección General de Salud del MSPAS (12)

3.6.2 SANEAMIENTO AMBIENTAL

A continuación se presentan algunos datos sobre saneamiento ambiental.

TABLA 3.2 SANEAMIENTO AMBIENTAL DEL CANTON SAN JERÓNIMO
LOS PLANES

| | | | |
|------------------------|---|--------------------|-----|
| Letrinas | Casas que tienen | | 187 |
| | Casas que no tienen | | 13 |
| | Tipo | De fosa | 184 |
| | | Abonera | 3 |
| | | De lavar o inodoro | -- |
| | En uso | si | 187 |
| | | no | -- |
| | Mantenimiento de letrina | Aplican | 140 |
| No Aplican | | 47 | |
| Disposición de basura | Casas que depositan en en campo abierto | | 83 |
| | En Río | | -- |
| | La queman | | 68 |
| | La entierran | | 49 |
| | Deposito a basurero público | | -- |
| Higiene de la vivienda | Bueno | | 127 |
| | Regular | | 55 |
| | Deficiente | | 18 |
| Control de rabia | Presencia de animales | Si | 104 |
| | | No | 96 |
| | Numero | Perros | 159 |
| | | Gatos | 6 |
| | Vacunados | Perros | 126 |
| | | Gatos | 5 |

Fuente : Dirección General de Salud del MSPAS (12)

CAPITULO V

DETERMINACIONES ANALITICAS

5.1 PRIORIDAD DE LOS ANALISIS

Al hablar de prioridad de análisis, se entenderá aquellas mediciones que son necesarias de efectuar en forma casi inmediata o tan rápidamente como fuere posible, ya que la demora de su ejecución repercute en los resultados obtenidos.

A continuación se presenta el orden prioritario de realización de análisis fisicoquímico.

1. Temperatura
2. pH
3. Conductividad eléctrica (sólidos disueltos)
4. Dióxido de Carbono (CO_2)
5. Nitratos (NO_3^{-1})
6. Sulfatos (SO_4^{-2})
7. Cloruros (Cl^{-1})
8. Dureza Total

5.2 CRITERIOS PARA SELECCIONAR VARIABLES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Para la selección de las variables físicas y químicas a medir se toman los siguientes criterios :

1. Que las variables a seleccionar intervengan en el fenómeno de la contaminación del agua lluvia, ya sea en forma directa (sulfatos, dióxido de carbono, nitratos, cloruros, etc) o indirectamente (temperatura).

2. Que estas variables se encuentren en concentraciones tales que puedan ser detectadas por el método de análisis empleado.
3. Disponer del método de análisis adecuado para la medición de dichas variables y que se adapten a las necesidades requeridas y a los recursos disponibles.

5.2.1 SELECCIÓN DE VARIABLES FÍSICAS

En base a los criterios anteriores se han seleccionado las siguientes variables :

5.2.1.1. TEMPERATURA

Esta variable influye en las reacciones químicas ya que es considerada como un catalizador natural; influye también en la solubilidad de diferentes sustancias, por lo que se medirá la temperatura de caída al inicio y al final de cada precipitación.

5.2.1.2. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (SÓLIDOS DISUELTOS)

Se ha seleccionado esta variable debido a que a través de la conductividad eléctrica pueden cuantificarse los sólidos totales ionizables que son representativos de todas las sustancias que intervienen en la acidez del agua lluvia. También están incluidas las sustancias que no influyen en la acidez.

5.2.1.3. VOLUMEN PRECIPITADO

Estudios relacionados con la captación del agua lluvia para fines de consumo humano involucran esta variable.

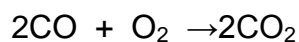
5.2.2. SELECCIÓN DE VARIABLES QUÍMICAS

5.2.2.1.pH

Con el potencial del ión hidrógeno (pH), se estará determinando la acidez del agua lluvia, la cual podría ser provocada por los ácidos disueltos en ellos : ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido nítrico (HNO₃), ácido carbónico (HCO₃) y ácido clorhídrico (HCl).

5.2.2.2. DIÓXIDO DE CARBONO LIBRE

El CO₂ es un componente natural del aire y es el producto de la oxidación del monóxido de carbono (CO) :



el cual en presencia de humedad forma ácido carbónico que aporta acidez al agua lluvia.



Por ser el CO y CO₂ producidos antropogénicamente y que por lo general el CO₂ sobrepasa el nivel de 0.03 % V/V es considerado un contaminante atmosférico que estará aportando acidez al agua lluvia por lo que su determinación se hace necesaria.

5.2.2.3. NITRATOS

Estos provienen principalmente del monóxido y dióxido de nitrógeno, emanados principalmente por el transporte y procesos industriales los cuales se convierten

finalmente en ácido nítrico (HNO_3) y nitratos (NO_3^-), especies que influyen en la acidez del agua lluvia. Se cuantificarán los nitratos.

5.2.2.4. SULFATOS

Los sulfatos son el resultado de la oxidación de los compuestos azufrados, provenientes del carbón, gasolina, gas propano así como de procesos industriales que se pueden estar usando en el Área Metropolitana de San Salvador, los cuales en contacto con la humedad forman ácido sulfúrico que incide en la acidez del agua lluvia, por lo que su medición nos dará pautas sobre los efectos de éste

5.2.2.5. CLORUROS

Se ha seleccionado esta variable debido a que es probable que en San Salvador se genere ácido clorhídrico a partir de atmósferas salinas procedentes del mar. Se efectuará su respectivo análisis.

5.2.2.6. DUREZA TOTAL

La dureza es una característica química del agua que esta determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y ocasionalmente nitratos de calcio y magnesio.

La dureza es indeseable en algunos procesos, tales como el lavado doméstico e industrial, provocando que se consuma más jabón, al producirse sales insolubles. La mayoría de los suministros de agua potable tienen un promedio de 250 mg / Litro de dureza.

CAPITULO VII

TRATAMIENTO DE AGUA PARA FINES DE CONSUMO HUMANO

INTRODUCCIÓN

Los métodos para reducir la carga contaminante inorgánica de aguas provenientes de fuentes subterráneas, superficiales u otro origen tales como agua lluvia, involucran un conjunto de operaciones y proceso unitarios agrupados en cuatro niveles:

1. Pretratamiento.
2. Tratamiento primario.
3. Tratamiento secundario.
4. Tratamiento terciario.

El nivel del tratamiento dependerá de la calidad físico-química del agua a tratar, los usos y los recursos técnicos económicos disponibles.

7.1 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS METODOS DE SEPARACIÓN

La decisión de elegir un método de tratamiento para la separación de aquellos contaminantes químicos analizados durante el muestreo realizado en la época lluviosa se basó en las características del tratamiento tales como:

- a) Nivel de contaminación del agua lluvia:

Los resultados obtenidos de la caracterización del agua lluvia permitieron evaluar las posibles alternativas de acuerdo al grado de contaminación de los parámetros analizados presentes en el agua, seleccionando un método de separación el cual será desarrollado a escala de laboratorio.

b) Tecnología del método de separación:

El proceso de separación debe ser una técnica apropiada al medio donde se implemente; de fácil puesta en operación, fácil mantenimiento, que no necesite dispositivos de alto costo e insumos químicos adicionales.

c) Condiciones socio-económicas de la zona donde se pretende implementar el sistema de tratamiento:

Debe tenerse en cuenta que los beneficiarios de la propuesta son personas de bajos recursos económicos por lo que el método de separación propuesto no implique un costo excesivo a los habitantes del lugar, debido al mantenimiento de este sistema.

La propuesta seleccionada con la cual se ensayará debe cumplir con estos tres requisitos a fin de implementarla en la zona de interés.

7.2 LA ADSORCION APLICADA EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

Ciertos materiales sólidos tienen la propiedad de retener selectivamente sobre su superficie partículas sólidas, líquidas o gaseosas; a este proceso se le conoce como adsorción.

7.2.1 ADSORCION EN SUPERFICIES SÓLIDAS

Toda superficie sólida observada desde el microscopio presenta irregularidades sobre su área. Las regiones de irregularidades son particularmente susceptibles a campos de fuerza residuales y los átomos superficiales del sólido pueden atraer otros átomos o moléculas de cualquier fase gas o líquida que los rodee. También a causa de su estructura atómica, las superficies de los cristales puros tienen

campos de fuerzas no uniformes con sitios o centros activos donde la adsorción es mayor.

La adsorción presenta dos tipos :

a) Adsorción Física

Este tipo de adsorción se asemeja al proceso de condensación. Se caracteriza porque las fuerzas que atraen las moléculas del fluido a la superficie sólida son débiles, y el proceso va siempre acompañado de una liberación de calor del mismo orden de magnitud que el calor de condensación. Un rápido equilibrio de carácter reversible se establece entre las moléculas del fluido y del sólido a causa de los bajos requerimientos energéticos.

b) Adsorción Química

Es un tipo específico de adsorción y envuelve fuerzas mucho más fuertes que la adsorción física. Las moléculas adsorbidas son mantenidas en la superficie por medio de fuerzas de valencia semejantes a las que ocurren entre los átomos en las moléculas. Esta adsorción va acompañada por calores de la mismas magnitud que los calores de reacción química. La magnitud de la adsorción química no excede a aquellas correspondiente a una capa monomolecular, debido a que las fuerzas de valencia que mantienen las moléculas en la superficie disminuyen rápidamente con la distancia.

7.2.2 CARACTERITICAS GENERALES DEL PROCESO DE ADSORCION

El hecho característico del proceso de adsorción es la afinidad observada entre el soluto y el adsorbente. La afinidad no es sin embargo el único factor que determina el grado de retención del soluto, hay un equilibrio dinámico que envuelve al soluto, al adsorbente y al solvente utilizado para la disolución y/o el arrastre del soluto. El solvente así como el soluto, es siempre adsorbido de la

solución. Hay una competencia entre las partículas de soluto y solvente mientras chocan para ocupar la superficie del adsorbente. Entre más fuertemente es adsorbido el solvente, mayor es la competencia para la adsorción del soluto.

El adsorbente debe entonces exhibir afinidad preferencial o selectiva para los diferentes solutos, y simultáneamente, el solvente debe disolver los solutos y proporcionar una fuerza impulsora para la migración de éstos cuando el proceso se realiza en una columna rellena con el adsorbente utilizado.

Otra característica del proceso de adsorción es que un número finito de etapas de equilibrio reduciría la concentración de un soluto a cero si la solución conteniendo al soluto fuera sucesivamente sometida al proceso de adsorción con adsorbente fresco.

Frecuentemente, se dice que son casi instantáneas todas las adsorciones que no son de naturaleza química, como ocurre en la adsorción física de gases y vapores por adsorbentes sólidos. Sin embargo, no es de esperar tal rapidez en la adsorción de líquidos por sólidos.

Con frecuencia ocurre que un ión de un electrolito es adsorbido más fuertemente que otros iones por determinados adsorbentes. En unos casos, los cationes son adsorbidos más fuertemente que los aniones, otras veces ocurre lo contrario. Esta adsorción preferencial de iones casi siempre es efecto de una doble descomposición, en la que uno de los iones del adsorbente es desalojado hacia la solución, o un ión de alguna impureza que hay sobre el adsorbente es desalojado e ingresa en la solución.

7.2.3 EL INTERCAMBIO IONICO

El proceso de intercambio iónico se presenta cuando existe una reacción química reversible, resultado de la transferencia de cantidades equivalentes de iones entre un medio sólido poroso pulverizado de intercambio y una solución diluida. La reacción suele efectuarse a través de un lecho o manto del sólido intercambiador.

Todos los materiales intercambiadores de iones llegan a un punto de saturación en el cual ya no ejercen ninguna acción sobre la solución que pasa por ellos, es decir que la solución sale con el mismo contenido de iones con que entra. A este punto se le llama punto de saturación y a la cantidad de iones eliminados por unidad de volumen de material intercambiador, se le llama capacidad total.

Existen cambiadores catiónicos y aniónicos. Los catiónicos tienen una estructura cargada negativamente, pero sus poros contienen cationes que mantienen su electro neutralidad. Los cambiadores aniónicos poseen las cargas eléctricas exactamente opuestas. Para ser efectivos, los intercambiadores deben :

- a) Contener sus propios iones
- b) Ser insolubles en agua
- c) Proporcionar suficiente espacio en su estructura para que los iones pasen libremente al interior y hacia el exterior del sólido.

La selección de un medio adsorbente, es una operación muy importante y presenta el problema de que cada sustancia que se va a remover posee caracteres propios, siendo imposible hacer generalizaciones. Sin embargo, un medio adsorbente debe reunir las siguientes características (5):

- a) Capacidad de retener los sólidos sin obstruirse.
- b) Capacidad de impedir que las partículas densas penetren en sus poros, lo que aumenta la resistencia a la circulación.
- c) Fuera del intercambio iónico, debe ser química y físicamente inerte.
- d) Resistencia mecánica: evitar el desgaste y soportar la presión.
- e) Resistencia mínima a la circulación del filtrado.

7.2.4 MATERIALES ADSORBENTES

El intercambio iónico es un caso de adsorción y los suelos son importantes cambiadores de iones, especialmente los suelos arcillosos. También los

sedimentos del fondo de los ríos y lagos poseen una capacidad considerable de intercambio, sobre todo para los cationes. La alúmina, SiO_2 , MnO_2 , los fosfatos y sulfuros metálicos, la lignina, proteínas, celulosa, madera, células vivientes, carbón y resinas; tienen propiedades de intercambio iónico.

Los sólidos intercambiadores de iones utilizados inicialmente fueron minerales porosos, naturales que contenían sílica: las zeolitas, como por ejemplo el $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

La elección de los materiales adsorbentes es, con frecuencia la consideración más importante para asegurar el funcionamiento satisfactorio de una columna para la remoción de contaminantes.

Ya se han elaborado trabajos en los que se pretende la utilización de diversos materiales que pertenecen a la geología salvadoreña en el tratamiento de agua para fines de consumo humano (1, 2, 5 y 7) . Sin embargo, en el campo del abastecimiento de agua potable se ha comprobado que, además del material o materiales que componen una columna de adsorción, otra variable importante del proceso es la naturaleza de la matriz composición del agua a tratar (13) , es decir, el efecto interferente que un contaminante específico puede tener en la remoción de otro cuando estos se encuentran presentes en una misma muestra de agua a tratar. Lo anterior justifica la utilización de materiales ya probados en el tratamiento de agua para fines de consumo, en la remoción de contaminantes de una fuente diferente de abastecimiento, como es el agua de lluvia.

Los materiales seleccionados como medios de retención son:

1. Arena de río.
2. Lava volcánica.
3. Perlita.
4. Carbón activado.

A continuación se describen los materiales utilizados.

7.2.4.1 PIEDRA VOLCÁNICA

Un estudio sobre la posible capacidad de intercambio iónico de la piedra volcánica en tratamiento de agua (17) presentó el análisis recopilado de muestras de lava de Quezaltepeque (Volcán de San Salvador) y de San Miguel, estos resultados aparecen en la tabla 6.1.

La piedra volcánica existente en El Salvador puede clasificarse como de la serie basáltica en base a su contenido de sílice (más de 50 %P/P) . Esto justifica su utilización en pruebas de remoción de contaminantes vía intercambio iónico.

TABLA 7.1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA PIEDRA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN DE QUEZALTEPEQUE Y SAN MIGUEL

| ELEMENTO | OXIDO | PORCENTAJE DE OXIDO PIEDRA DE QUEZALTEPEQUE | PORCENTAJE DE OXIDO PIEDRA DE SAN MIGUEL |
|-----------------------|--------------------------------|---|--|
| Si | SiO ₂ | 51.360 | 47.080 |
| Al | Al ₂ O ₃ | 15.120 | 19.278 |
| Fe | Fe ₂ O ₃ | 16.016 | 10.468 |
| Ca | CaO | 1.769 | 3.598 |
| Mg | MgO | 1.726 | 2.756 |
| Na | Na ₂ O | 3.687 | 2.835 |
| K | K ₂ O | 1.603 | 0.844 |
| Perdidas por ignición | | 1.510 | 0.875 |
| Total | | 92.791 | 88.834 |

Fuente : López Torres, 1986.

Con el interés del aprovechamiento de un recurso no explotado en El Salvador, se han realizado algunos estudios sobre la utilización industrial de la piedra volcánica.

En el mismo estudio anterior se obtuvo una baja capacidad para remover iones calcio y magnesio, lo que originó a su vez, tiempos cortos de agotamiento y por consiguiente pequeños volúmenes de agua tratada con dureza mínima. Además, no lograron mejorar la conductividad del agua. En 1976 se realizaron pruebas de adsorción de colorante con piedra volcánica proveniente del volcán de San Salvador (5). En dichas pruebas se varió el tamaño de partícula y se le sometió a lavados. Los resultados llevaron a concluir que la piedra volcánica puede ser utilizada como un adsorbente de tipo selectivo, siendo el tamaño de partícula más adecuado el comprendido entre las mallas 100 y 200 de la serie Tyler cuando se trabaja bajo la acción de la gravedad.

Se concluyó además que las propiedades adsorbentes del material no pueden ser incrementadas por tratamientos con ácidos y/o bases fuertes, y que al contrario, dicho tratamientos hacían decrecer tales propiedades. Así mismo se observó que el proceso de calcinación aumentaba la eficiencia de adsorción.

Se han evaluado las propiedades filtrantes de la piedra volcánica utilizándola en la filtración de aguas negras provenientes del río Acelhuate (5). Con porcentajes de retención de sólidos suspendidos del 92% y del 96% se demostró que la piedra volcánica posee una gran capacidad para remover sólidos suspendidos en soluciones acuosas. Se concluyó que un filtro de piedra funcionaría mejor entre más alta fuera la columna del medio filtrante y más pequeño el tamaño de su partícula.

Se ha utilizado también (15) en la remoción de boro y arsénico de las agua del Lago de Ilopango. En estas pruebas se obtuvo hasta 95% de remoción de arsénico por método de filtración directa con piedra volcánica.

7.2.4.2 ARENA

Las columnas de arena se utilizan para el tratamiento de las aguas ligeramente turbias y generalmente no poseen coagulación ni sedimentación previa. La arena ha sido usada universalmente como material filtrante y adsorbente tanto para filtros lentos como rápidos y a presión. La arena puede ser calificada de acuerdo con la variación del tamaño y su distribución, formas y sus variaciones, peso específico y composición química.

La composición química general de la arena es :

- Feldespato: la ortosa, feldespato monoclinico con fórmula $KAISi_3O_8$, es una de los minerales más comunes.
- Magnetita: mineral y Mena común del hierro, cuya composición es Fe_3O_4
- Cuarzo: compuesto por dióxido de silicio, o sílice, SiO_2
- Mica: moscovita, flogopita, lepidolita y la biotita.
- Feldespato: la ortosa, feldespato monoclinico con fórmula $KAISi_3O_8$, es una de los minerales más comunes.

Un estudio evaluó el funcionamiento de un filtro de arena de goteo lento para potabilización de agua (2) concluyó que la calidad del agua alcanzada con el filtro utilizado no estaba dentro de los estándares de agua potable, no obstante aseguran que mejoró la calidad de la misma en comparación con la obtenida directamente de la fuente (pozo).

7.2.4.3 PERLITA

Clasificada como un vidrio volcánico con un contenido del 2% al 5% de humedad, cuya composición y propiedades físicas incluyendo color, gravedad especifica, índice de refracción y dureza; varían considerablemente.

En la tabla 6.2 .se presentan las propiedades químicas de la perlita

La perlita como un termino petrográfico, se aplica a un vidrio volcánico que tiene una estructura en forma de cebolla, la cual es visible a simple vista o en algunos casos en microscopio.

TABLA 7.2 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA PERLITA CRUDA

| COMPONENTE | % P/P PROMEDIO |
|--------------------------------|----------------|
| SiO ₂ | 71.0—75.0 |
| Al ₂ O ₃ | 12.5---180 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.5---1.5 |
| FeO | 0---0.1 |
| CaO | 0.5---2.0 |
| MgO | 0.1---0.5 |
| Na ₂ O | 2.9---4.0 |
| H ₂ O | 4.0---5.0 |
| H ₂ O ligada | 3.0---5.0 |

FUENTE: Estudios sobre el uso industrial de minerales no metálicos en El Salvador

Comúnmente este mineral contiene inclusiones tales como Microlitos, Cristalitos, y Esferulitas; Fenocristales de cuarzo, Feldespato, Biotita y Hornablenda; y Microfenocristales de Magnetita, Ilmenita(hierro titanado), hematita.

Se realizó un estudio sobre las diferentes aplicaciones industriales de la perlita expandida en la Universidad de El Salvador llevado a cabo en la Escuela de Ingeniería Química por Amaya Dubon en el año de 1980 (1), dicha investigación evaluó los posibles usos de este mineral a nivel industrial; entre los que se estudio la aplicación como material filtrante para la separación de contaminantes de aguas residuales.

Anterior a este estudio se realizaron investigaciones sobre yacimientos de perlita en el país efectuados por Misiones Geológicas Alemanas en la década de los setenta, siendo los primeros sobre este mineral en Centroamérica.

Se identificó una zona de afloramiento al norte de la línea, entre los lagos Coatepeque-Ilopango-Olomega, formando una amplia faja de 30 a 40 Km. de ancho que atraviesa todo El Salvador, del poniente al oriente (1).

7.2.4.4 CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado es un material de carbón que se prepara para que tenga una elevada superficie interna y así poder adsorber (retener sobre su superficie) una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución.

Son dos las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado: elevada capacidad y baja selectividad de retención. La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, si bien su porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante.

Por otra parte, el carbón activado tiene escasa especificidad ante un proceso de retención, es un adsorbente "universal". No obstante, por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, retendrá preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molecular (hidrocarburos, fenoles, colorantes.), mientras que sustancias como el nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no se retienen por el carbón a temperatura ambiente.

CAPITULO VIII

ETAPA EXPERIMENTAL: TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA

INTRODUCCIÓN

A continuación se describe la preparación de los materiales adsorbentes, la construcción de las columnas de adsorción y las pruebas de separación de contaminantes. Este capítulo finaliza con la presentación de los resultados obtenidos.

8.1 CONSTRUCCION DE LAS COLUMNAS DE ADSORCION A ESCALA DE LABORATORIO

8.1.1 PREPARACION DEL MATERIAL ADSORBENTE

En general los tratamientos aplicados a los materiales adsorbentes se clasifican en físicos y químicos. Los materiales se preparan para :

1. Activar las propiedades adsorbentes
2. Uniformar el tamaño de partículas (Tamizado) para su posterior separación en tamaños
3. Separar materiales orgánicos e inorgánicos (tratamientos de lavado y calcinación)
4. En general, es justificable cualquier operación unitaria que mejore la capacidad de adsorción del lecho.

La aplicación se llevo a cabo en serie combinando los tratamientos físicos y químicos tal como se describe en la figura 8.1.

Para cada material adsorbente seleccionado se utilizó una muestra de diámetro de partícula definido al cual se aplicó el tratamiento físico y químico previo antes de su evaluación en el laboratorio.

La tabla 8.1 detalla los tratamientos aplicados a cada elemento o material.

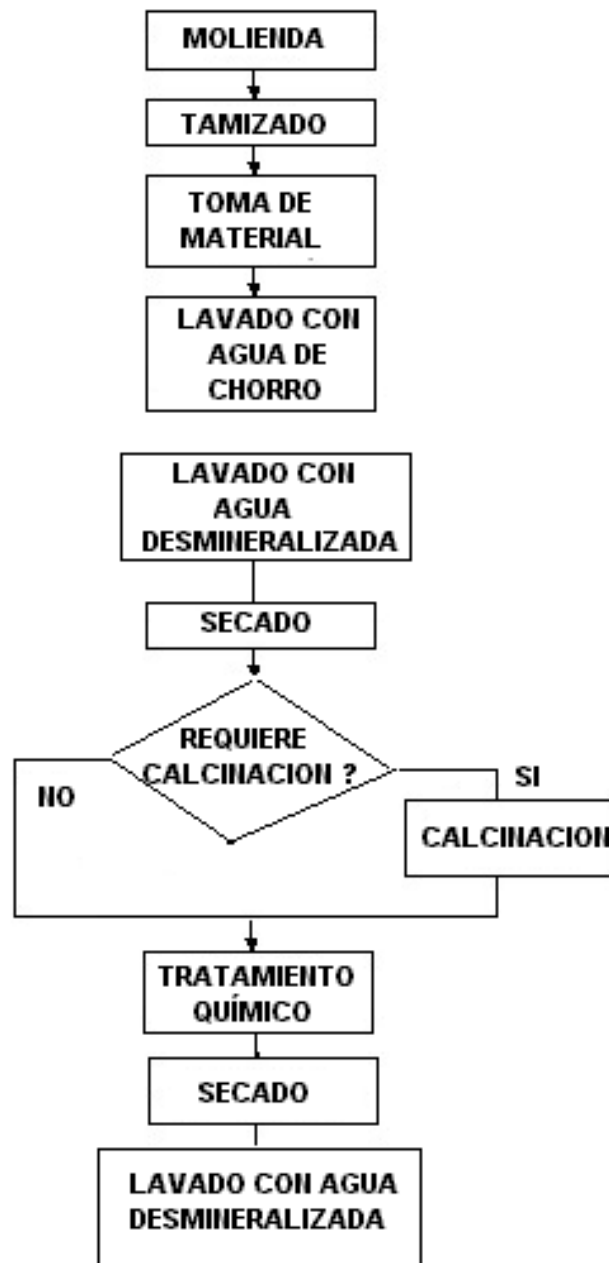


FIG. 8.1 TRATAMIENTO DE LOS MATERIALES

TABLA 8.1: TRATAMIENTO FISICO-QUIMICO APLICADO A LOS MEDIOS ADSORBENTES







| TRATAMIENTO | TRATAMIENTO FISICO | | | | TRATAMIENTO QUIMICO | | | | |
|--|-----------------------|------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------------|
| MATERIAL | Temperatura de secado | Tiempo de Secado | Temperatura de Calcinación | Tiempo de Calcinación | ml H2O Desmineralizada | ml de HCl | ml de NaOH | ml de NaCl | ml de NaClO ₂ |
| Perlita malla 20  | 150°C | 3 hrs | 900°C | 3 hrs | 10 Litros | 300 ml (10% v/v) | ----- | ----- | ----- |
| Perlita malla 30  | 150°C | 3 hrs | 900°C | 3 hrs | 10 Litros | 300 ml (10% v/v) | ----- | ----- | ----- |
| Lava volcanica sin calcinar  | 150°C | 2 hrs | ----- | ----- | 10 Litros | 250 ml concentrado | 250 ml (40% v/v) | 250 ml (50% v/v) | |

TABLA 8.1: CONTINUACION

| TRATAMIENTO | TRATAMIENTO FISICO | | | | TRATAMIENTO QUIMICO | | | | |
|--|-----------------------|------------------|----------------------------|-----------------------|--|--------------------|------------------|------------------|--------------------------|
| MATERIAL | Temperatura de secado | Tiempo de Secado | Temperatura de Calcinación | Tiempo de Calcinación | ml de H ₂ O Desmineralizada | ml de HCl | ml de NaOH | ml de NaCl | ml de NaClO ₂ |
| Lava volcánica calcinada  | 150°C | 2 hrs | 400°C | 3 hrs | 10 Litros | 250 ml concentrado | 250 ml (40% v/v) | 250 ml (50% v/v) | ----- |
| Arena malla 20  | 150°C | 3 hrs | ----- | ----- | 15 Litros | 100 ml concentrado | ----- | ----- | 100 ml |
| Arena malla 30 + carbón  | 150°C | 4 hrs | ----- | ----- | 15 Litros | 100 ml concentrado | ----- | ----- | 100 ml |

8.1.2 CONSTRUCCION DE LAS COLUMNAS DE ADSORCION

Preparado el material adsorbente se construyo el sistema de adsorción como etapa previa a las pruebas de separación que se realizaron con el agua lluvia.

Los materiales que se utilizaron como soporte del medio adsorbente fueron obtenidos en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química ,algunos fueron modificados para adecuarlos a los fines de esta investigación. Los elementos utilizados en el filtro son:

- ❑ Tubos de vidrio.
- ❑ Soportes metálicos.
- ❑ Pinzas de sostén
- ❑ Válvulas de cristal
- ❑ Tapones de hule.
- ❑ Soportes para los lechos.

En la figura 8.2 se describe el ensamble de cada columna. Este consiste en :

1. Una probeta que contiene la muestra de agua lluvia a tratar con capacidad de 250 ml.
2. Una válvula para el ajuste del caudal a goteo lento.
3. Un cuerpo cilíndrico de vidrio.
4. El material adsorbente: perlita expandida malla 20 US, perlita expandida malla 30 US, arena de río malla 30 US, piedra volcánica malla 20 US calcinada, piedra volcánica malla 20 sin calcinar y arena de río malla combinada con carbón activado.
5. Una válvula para la salida del agua tratada.
6. Un recipiente colector plástico para colectar el agua lluvia con capacidad de 500 ml

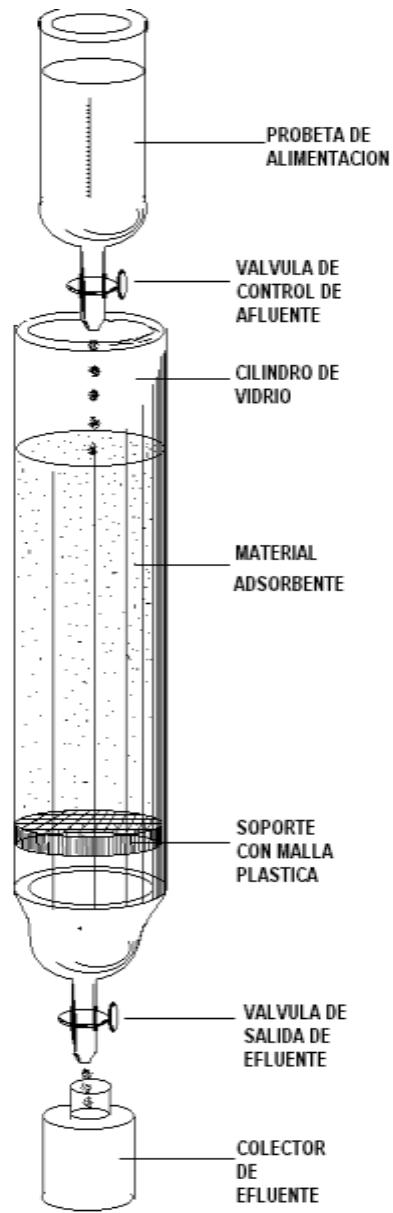


FIGURA 8.2 PARTES DE LA COLUMNA

En la tabla 8.2 se presenta las especificaciones de las columnas empleadas en las pruebas.

TABLA 8.2. CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE LAS COLUMNAS





| COLUMNA | Diámetro interno(cm) | Altura (cm) | Peso del Material Adsorbente (gr) | ENSAMBLE DE LA COLUMNA |
|------------------|----------------------|-------------|-----------------------------------|---|
| Perlita malla 20 | 2.2 | 42 | 217 |  |
| Perlita malla 30 | 1.5 | 37.0 | 139.7 |  |

TABLA 8.2.: CONTINUACION

| COLUMNA | Diámetro interno(cm) | Altura (cm) | Peso del Material Adsorbente (gr) | ENSAMBLE DE LA COLUMNA |
|--------------------------|----------------------|-------------|-----------------------------------|---|
| Arena malla 30 | 4.1 | 12.0 | 132.0 |  |
| Lava volcánica calcinada | 2.1 | 38.5 | 132.3 |  |

TABLA 8.2.:CONTINUACION

| COLUMNA | Diámetro interno(cm) | Altura (cm) | Peso del Material Adsorbente (gr) | ENSAMBLE DE LA COLUMNA |
|-----------------------------|----------------------|-------------|-----------------------------------|---|
| Lava volcánica sin calcinar | 2.5 | 27.0 | 79.2 |  |
| Arena malla 30 + carbón | 5.5 | 22 | 139.7 (arena) 289.2 (carbón) |  |

8.2 PRUEBAS DE SEPARACIÓN DE CONTAMINANTES

Las pruebas de separación de contaminantes se desarrollaron en dos etapas :

8.2.1 PRUEBA DE LA EFECTIVIDAD DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS MATERIALES ADSORBENTES CUANDO EL AFLUENTE CONTIENE UN SOLO CONTAMINANTE EN ESPECIFICO.

Uno de los factores que influye en la adsorción por goteo lento en materiales adsorbentes es la naturaleza química del agua a tratar, por ello, se estudió la capacidad de remoción de cada material cuando este efecto es nulo. Para ello, se hizo pasar una solución de concentración conocida de cada contaminante, la cual contenía a este como única especie. La operación y las condiciones experimentales son similares a las ocurridas en la etapa de tratamiento de agua lluvia. A esta etapa se le llamó preexperimento.

A continuación se tabulan las soluciones utilizadas, su concentración y el volumen que de estas se paso por las seis columnas. Todas las soluciones se prepararon en el laboratorio. Para estudiar la variación del pH se utilizó una solución de Cloruro de Calcio . A todas las soluciones del efluente se les midió la conductividad eléctrica.

TABLA 8.3 SOLUCIONES ESTÁNDAR QUE PASARON POR LAS COLUMNAS

| SOLUCION ESTANDARD | CONCENTRACION | VOLUMEN TRATADO (ml) | ANÁLISIS REALIZADO EN EL EFLUENTE |
|---------------------------------|---|----------------------|-----------------------------------|
| CaCl ₂ | 25 mg/L del ion Ca ⁺² | 1000 | Dureza Total |
| Na ₂ SO ₄ | 25 mg/L del ion SO ₄ ⁻² | 1000 | Sulfatos |
| NaNO ₃ | 25 mg/l del ion NO ₃ ⁻¹ | 1000 | Nitratos |
| NaCl | 25 mg/L del ion Cl ⁻¹ | 1000 | Cloruros |

8.2.1.1 LAVADO DE LAS COLUMNAS DE ADSORCION

Terminada esta etapa, se procedió a lavar cada material. La efectividad de estas operaciones se verificó cualitativamente mediante la observación de la turbidez o cambio de color generado por un reactivo químico adicionado al efluente de los filtros después de ser sometidos a un lavado con agua desmineralizada.

Estas operaciones se realizaron después de pasar cada una de las soluciones estándar, se resumen en la tabla 8.3 .

TABLA 8.4: LAVADO DE LAS COLUMNAS

| COLUMNA | SOLUCION ESTANDAR QUE PASO POR LA COLUMNA | VOLUMEN DE AGUA DESMINERALIZADA DE LAVADO , mL | INDICADOR DE LA PRESENCIA DE IONES | | | |
|-------------------------------|---|--|------------------------------------|-------------------|---------------|-----------------------|
| | | | AgNO ₃ Conc. | BaCl ₂ | Fenolftaleína | Observaciones |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 20 US | CaCl ₂ | 500 | turbidez | Inc. | Inc. | La turbidez es mínima |
| | Na ₂ SO ₄ | 1000 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| | NaNO ₃ | 500 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| | NaCl | 750 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| | Agua desmineralizada | 500 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 US | CaCl ₂ | 500 | | | | |
| | Na ₂ SO ₄ | 500 | Inc. | Inc. | turbidez | Turb. mínima |
| | NaNO ₃ | 750 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| | NaCl | 1000 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| | Agua desmineralizada | 500 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |

TABLA 8.4 CONTINUACION

| COLUMNA | SOLUCION ESTANDAR QUE PASO POR LA COLUMNA | VOLUMEN DE AGUA DESMINERALIZADA DE LAVADO , mL | INDICADOR DE LA PRESENCIA DE IONES | | | |
|--|---|--|------------------------------------|-------------------|------------------|-----------------------------|
| | | | AgNO ₃ Conc. | BaCl ₂ | Fenolftaleina | Observaciones |
| ARENA DE RIO MALLA 30 US | CaCl ₂ | 750 | Turbidez alta | Turbidez alta | Inc. | Inundación y turbidez parda |
| | Na ₂ SO ₄ | 1000 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| | NaNO ₃ | 250 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| | NaCl | 500 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| | Agua/desmineralizada | 500 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| PIEDRA VOLCANICA CALCINADA MALLA 20 US | CaCl ₂ | 500 | Inc. | Inc. | * | --- |
| | Na ₂ SO ₄ | 650 | Turbidez | Inc. | Inc. | --- |
| | NaNO ₃ | 500 | Inc. | Inc. | Inc. | |
| | NaCl | | | | | |
| | Agua desmineralizada | 500 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| PIEDRA VOLCANICA SIN CALCINAR MALLA 20 US | CaCl ₂ | 550 | Turbidez baja | Inc. | Inc. | --- |
| | Na ₂ SO ₄ | 500 | Inc. | Inc. | Turbidez mínima | --- |
| | NaNO ₃ | 250 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| | NaCl | 500 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| | Agua desmineralizada | | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| ARENA DE RIO MALLA 20 US Y CARBÓN ACTIVADO | CaCl ₂ | 750 | Inc. | Inc. | Lechoso (rozado) | --- |
| | Na ₂ SO ₄ | 500 | Turbidez baja | Inc. | Inc. | --- |
| | NaNO ₃ | 1000 | Turbidez alta | Inc. | Inc. | --- |
| | NaCl | 500 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |
| | Agua desmineralizada | 1000 | Inc. | Inc. | Inc. | --- |

8.2.1.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PREEXPERIMENTO

TABLA 8.5 pH DEL EFLUENTE , SOLUCION ESTÁNDAR : CaCl₂ 25 mg/L

| EFLUENTE COLUMNA | 500 mL | 1000 mL | 1500 mL |
|--|--------|---------|---------|
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 20 US | 4.13 | 4.0 | 4.23 |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 US | 4.27 | 4.12 | 4.27 |
| ARENA DE RIO MALLA 30 US | 3.21 | 3.21 | 3.21 |
| PIEDRA VOLCANICA CALCINADA MALLA 20 US | 5.70 | 5.76 | 5.74 |
| PIEDRA VOLCANICA SIN CALCINAR MALLA 20 US | 3.78 | 3.78 | 3.78 |
| ARENA DE RIO MALLA 20 US Y CARBÓN ACTIVADO | 4.48 | 4.41 | 4.48 |
| AFLUENTE : 6.60 | | | |

TABLA 8.6 CONDUCTIVIDAD ELECTRICA $\mu\text{S/cm}$, SOLUCION ESTÁNDAR : CaCl₂ 25 mg/L

| EFLUENTE COLUMNA | 500 mL | 1000 mL | 1500 mL |
|--|--------|---------|---------|
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 20 US | 27.1 | 27.0 | 28.9 |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 US | 11.6 | 8.56 | 8.17 |
| ARENA DE RIO MALLA 30 US | 25.10 | 25.6 | 26.7 |
| PIEDRA VOLCANICA CALCINADA MALLA 20 US | 25.23 | 20.11 | 20.4 |
| PIEDRA VOLCANICA SIN CALCINAR MALLA 20 US | 26.9 | 26.12 | 26.12 |
| ARENA DE RIO MALLA 20 US Y CARBÓN ACTIVADO | 24.1 | 24.1 | 24.4 |
| AFLUENTE : 26.8 | | | |

TABLA 8.7 CONCENTRACION DE SULFATOS mg/L, SOLUCION ESTÁNDAR :

| EFLUENTE COLUMNA | 500 mL | 1000 mL | 1500 mL |
|--|--------|---------|---------|
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 20 US | 20.86 | 20.2 | 18.57 |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 US | 4.07 | 4.07 | 1.2 |
| ARENA DE RIO MALLA 30 US | 5.10 | 5.61 | 5.68 |
| PIEDRA VOLCANICA CALCINADA MALLA 20 US | 7.66 | 5.35 | 3.0 |
| PIEDRA VOLCANICA SIN CALCINAR MALLA 20 US | 5.8 | 5.14 | 5.6 |
| ARENA DE RIO MALLA 20 US Y CARBÓN ACTIVADO | 5 | 6.14 | 5.57 |
| AFLUENTE : 23.8 mg/L | | | |

TABLA 8.8 DUREZA TOTAL mg/L CaCO₃, SOLUCION ESTÁNDAR: CaCl₂

| EFLUENTE COLUMNA | 500 mL | 1000 mL | 1500 mL |
|--|--------|---------|---------|
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 20 US | 15.9 | 26.5 | 21.2 |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 US | 24.38 | 27.56 | 25 |
| ARENA DE RIO MALLA 30 US | 29.1 | 30 | 28 |
| PIEDRA VOLCANICA CALCINADA MALLA 20 US | 34.132 | 35.616 | 25.21 |
| PIEDRA VOLCANICA SIN CALCINAR MALLA 20 US | 6.36 | 7.42 | 6.89 |
| ARENA DE RIO MALLA 20 US Y CARBÓN ACTIVADO | 3.816 | 4.876 | 4.45 |
| AFLUENTE : 27.70 mg/L | | | |

8.2.2 TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA

Se desarrolló de la siguiente manera :

1. Agua lluvia del tanque familiar (Punto 5) se colocó en las buretas que se encuentran en la parte superior de cada columna hasta la marca de 250 ml.
2. Se abrieron simultáneamente las válvulas procurando un goteo lento.
3. El agua colectada en la parte inferior de la columna (Efluente) se refrigeró para su posterior análisis.
4. Una vez que la bureta se vaciaba, se tomó el tiempo requerido para ello y se volvió a llenar hasta la marca de 250 ml.
5. El efluente de cada columna se separó cada 500 ml.
6. Las condiciones experimentales para cada filtro fueron similares.

En la figura 8.3 se muestran las columnas en el momento del tratamiento del agua lluvia.



FIG. 8.3 CONJUNTO DE COLUMNAS UTILIZADAS

El siguiente esquema explica el orden de las operaciones.

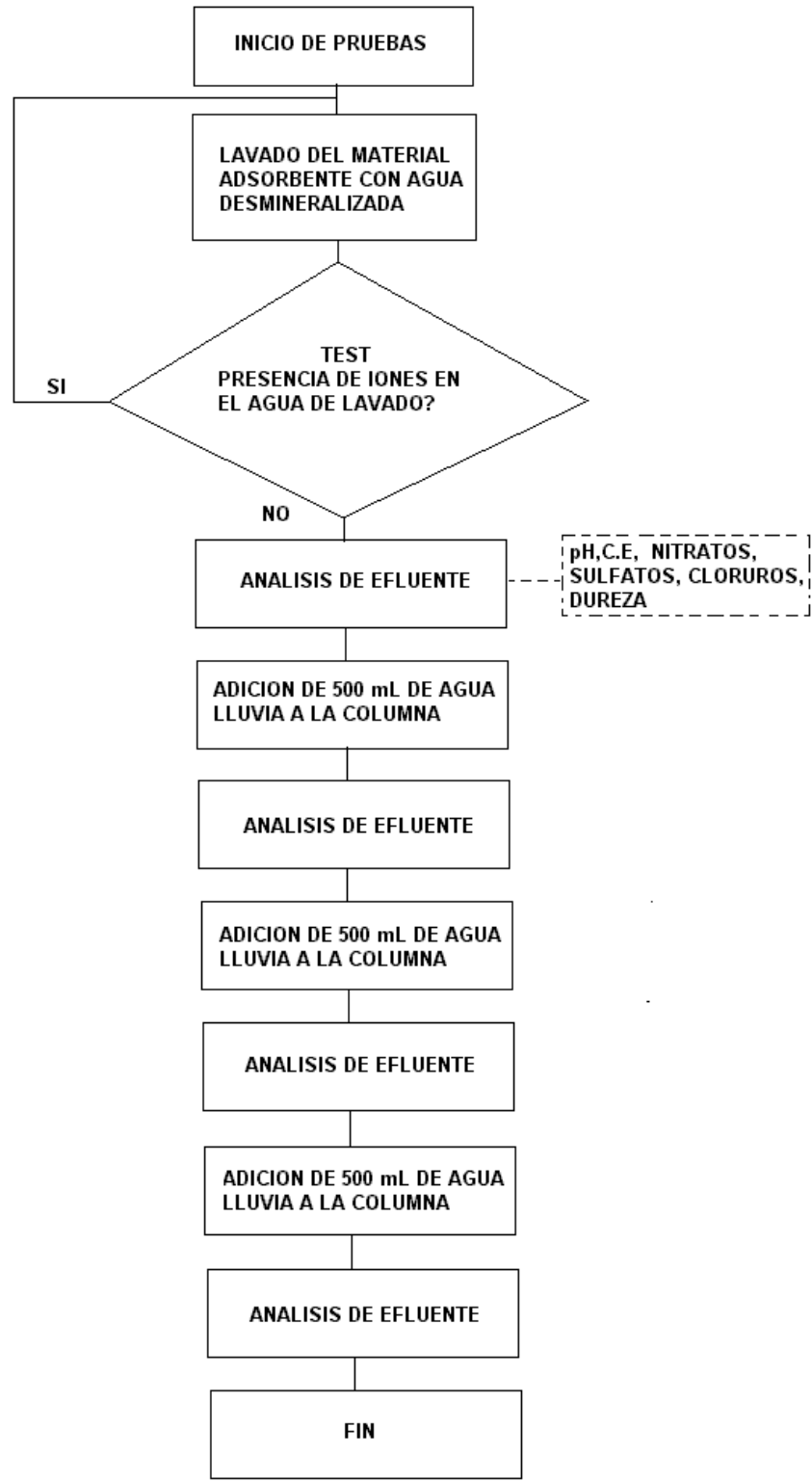


FIG. 8.4 TRATAMIENTO DEL AGUA LLUVIA

8.3 RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de tratamiento del agua lluvia en las columnas a escala de laboratorio. Para cada columnas se encuentran los resultados del análisis del efluente a 500 ml, 1000 ml y a 1500 ml. estos datos han sido obtenido en tres corridas bajo las mismas condiciones operacionales.

Se han excluido aquellos datos que por diferentes situaciones no se lograron analizar en el tiempo que recomienda la Norma Salvadoreña Obligatoria Para la calidad de Agua Potable, y que por ello representan un dato inseguro (en las tablas aparecen como : *).

TABLA 8.9. CONCENTRACION DEL ION HIDRÓGENO (pH)

| EFLUENTE COLUMNA | 500 mL | | | 1000 mL | | | 1500 mL | | |
|---|-------------------------------------|------|------|---------|------|------|---------|------|------|
| | PERLITA EXPANDIDA MALLA 20 US | 8.23 | 8.2 | 8.12 | 8.23 | 8.1 | 8.1 | 6.23 | 6.58 |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 US | 7.72 | 7.65 | 7.69 | 7.72 | 7.6 | 7.6 | * | * | * |
| ARENA DE RIO MALLA 30 US | 7.92 | 8.1 | 8.23 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | * | * | * |
| PIEDRA VOLCANICA CALCINADA MALLA 20 US | 8 | 8.1 | 8.09 | 8 | 8.2 | 8.1 | * | * | * |
| PIEDRA VOLCANICA SIN CALCINAR MALLA 20 US | 7.93 | 7.81 | 7.88 | 7.8 | 7.76 | 7.82 | * | * | * |
| ARENA DE RIO MALLA 20 US Y CARBÓN ACTIVADO | 8.3 | 8.49 | 8.34 | 8.02 | 7.98 | 8 | 8.01 | 8 | 8 |
| AFLUENTE : 8.64 | | | | | | | | | |

TABLA 8.10 CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (μ Siemens/ cm)

| EFLUENTE COLUMNA | 500 mL | | | 1000 mL | | | 1500 mL | | |
|---|-------------------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | PERLITA EXPANDIDA MALLA 20 US | 75.58 | 75.6 | 75.6 | 74.2 | 73.7 | 74.01 | 72.78 | 72.56 |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 US | 34.58 | 33.12 | 33.16 | 31.65 | 30.8 | 30.8 | 26.26 | 26.8 | 26.8 |
| ARENA DE RIO MALLA 30 US | 51.46 | 51.1 | 52.21 | 50.55 | 50.46 | 50.4 | 50.5 | 50.5 | 50.7 |
| PIEDRA VOLCANICA CALCINADA MALLA 20 US | 68.6 | 68.8 | 68.4 | 68.7 | 66.2 | 66.2 | 62 | 61.1 | 60.11 |
| PIEDRA VOLCANICA SIN CALCINAR MALLA 20 US | 88.3 | 88.3 | 88.3 | 87.1 | 87.1 | 87.1 | 80.4 | 80.6 | 80.1 |
| ARENA DE RIO MALLA 20 US Y CARBÓN ACTIVADO | 21.9 | 21.8 | 20.8 | 20.19 | 20.1 | 19.89 | 20.1 | 20.1 | 19.71 |
| AFLUENTE : 54.75 | | | | | | | | | |

TABLA 8.11. CONCENTRACION DEL ION NITRATO (mg/L)

| EFLUENTE COLUMNA | 500 mL | | | 1000 mL | | | 1500 mL | | |
|---|-------------------------------------|--------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | PERLITA EXPANDIDA MALLA 20 US | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 30.7 | 30.7 | 30.7 | 30.3 | 30.7 |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 US | 5.95 | 5.95 | 5.95 | 5.72 | 5.72 | 5.72 | 5.72 | 5.72 | 5.72 |
| ARENA DE RIO MALLA 30 US | 5.27 | 5.27 | 5.281 | 5.22 | 5.237 | 5.38 | 5.72 | 5.66 | 5.76 |
| PIEDRA VOLCANICA CALCINADA MALLA 20 US | 15.58 | 16.231 | 15.79 | 15.55 | 15.62 | 15.61 | 14.46 | 14.46 | 14.46 |
| PIEDRA VOLCANICA SIN CALCINAR MALLA 20 US | 41.82 | 41.81 | 41.82 | 41.81 | 42.89 | 40.34 | 40.67 | 38.56 | 38.77 |
| ARENA DE RIO MALLA 20 US Y CARBÓN ACTIVADO | 4.4 | 4.408 | 4.407 | 0.0615 | 0.062 | 0.061 | 1.27 | 1.275 | 1.161 |
| AFLUENTE : 5.27 | | | | | | | | | |

TABLA 8.12. CONCENTRACION DEL ION SULFATO (mg/L)

| EFLUENTE COLUMNA | 500 mL | | | 1000 mL | | | 1500 mL | | |
|---|-------------------------------------|------|------|---------|------|------|---------|---|---|
| | PERLITA EXPANDIDA MALLA 20 US | 5.35 | 4.84 | 4.84 | 3.03 | 2.66 | 2.66 | * | * |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 US | 4.07 | 4.07 | 4.07 | 3.86 | 3.00 | 3.00 | * | * | * |
| ARENA DE RIO MALLA 30 US | 5.10 | 5.61 | 5.61 | 5.20 | 4.86 | 4.86 | * | * | * |
| PIEDRA VOLCANICA CALCINADA MALLA 20 US | 5.35 | 5.35 | 5.35 | 2.49 | 2.49 | 2.49 | * | * | * |
| PIEDRA VOLCANICA SIN CALCINAR MALLA 20 US | 9.97 | 9.46 | 9.46 | 3.36 | 3.00 | 3.00 | * | * | * |
| ARENA DE RIO MALLA 20 US Y CARBÓN ACTIVADO | 3.82 | 3.82 | 3.82 | 3.53 | 3.82 | 3.82 | * | * | * |
| AFLUENTE : 6.38 | | | | | | | | | |

TABLA 8.13. CONCENTRACION DEL ION CLORURO (mg/L)

| EFLUENTE COLUMNA | 500 mL | | | 1000 mL | | | 1500 mL | | |
|---|-------------------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | PERLITA EXPANDIDA MALLA 20 US | 2.83 | 2.31 | 1.81 | 2.83 | 2.31 | 1.81 | 2.28 | 2.3 |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 US | 2.83 | 2.83 | 1.81 | 2.1 | 1.991 | 1.74 | 1.601 | 1.43 | 1.23 |
| ARENA DE RIO MALLA 30 US | 15.95 | 13.4 | 14.23 | 20.24 | 20.24 | 20.24 | 20.24 | 20.24 | 20.24 |
| PIEDRA VOLCANICA CALCINADA MALLA 20 US | 2.83 | 2.83 | 2.31 | 11.16 | 18.31 | 12.86 | 11.12 | 18.21 | 11.21 |
| PIEDRA VOLCANICA SIN CALCINAR MALLA 20 US | 24.23 | 23.87 | 23.87 | 22.24 | 14.62 | 28.6 | 21.08 | 14.87 | 23.22 |
| ARENA DE RIO MALLA 20 US Y CARBÓN ACTIVADO | 35.25 | 33.28 | 33.28 | 26.41 | 26.41 | 26.41 | 26.4 | 26.3 | 22 |
| AFLUENTE : 25.0 | | | | | | | | | |

TABLA 8.14. DUREZA TOTAL EXPRESADA COMO mg/L DE CaCO₃

| EFLUENTE COLUMNA | 500 mL | | | 1000 mL | | | 1500 mL | | |
|---|-------------------------------------|--------|--------|---------|-------|-------|---------|---|---|
| | PERLITA EXPANDIDA MALLA 20 US | 196.1 | 196.1 | 196.1 | 270 | 270 | 238.5 | * | * |
| PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 US | 198.22 | 198.22 | 198.22 | 110.22 | 108.1 | 108 | * | * | * |
| ARENA DE RIO MALLA 30 US | 201.74 | 233.2 | 116.6 | 201.4 | 233.2 | 116.6 | * | * | * |
| PIEDRA VOLCANICA CALCINADA MALLA 20 US | 234.26 | 273.48 | 273.48 | 270 | 270 | 238.5 | * | * | * |
| PIEDRA VOLCANICA SIN CALCINAR MALLA 20 US | 114.48 | 120.84 | 120.84 | 212 | 212 | 212 | * | * | * |
| ARENA DE RIO MALLA 20 US Y CARBÓN ACTIVADO | 59.36 | 58.3 | 58.3 | 61.1 | 62.67 | 64 | * | * | * |
| AFLUENTE : 437.42 | | | | | | | | | |

CAPITULO IX

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se discuten los resultados reportados de las pruebas de filtración los cuales se utilizaron para seleccionar el material filtrante adecuado, el cual se propone al final de este estudio.

El capítulo inicia con la presentación de los resultados de la caracterización fisicoquímica del agua lluvia a filtrar, siguiendo con los resultados del tratamiento del agua lluvia para cada contaminante : pH, Conductividad Eléctrica (CE), Nitratos, Cloruros, Sulfatos y Dureza Total. Al final se describe el desempeño de los materiales que fueron más efectivos en la remoción de los contaminantes cuyos niveles que no cumplen con la NSO #01ES/2000.

9.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL AFLUENTE TRATADO DURANTE LAS PRUEBAS DE REMOCIÓN

Previamente a la realización de las pruebas de remoción se analizó el agua lluvia de la zona con el propósito de comparar estas concentraciones con los resultados obtenidos en muestras de agua lluvia que fueron tratadas por cada columna.

En la tabla 9.1 se presentan los resultados de los análisis físico-químicos del afluente. En las pruebas de tratamiento se utilizó el agua lluvia almacenada en el tanque familiar (punto de muestreo No. 5), por ser uno de los puntos que mostró mayor nivel de contaminación.

TABLA 9.1 CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS DEL AGUA LLUVIA
UTILIZADA PARA LAS PRUEBAS DE REMOCIÓN

| CONTAMINANTE | VALOR |
|---|--------|
| pH | 8.64 |
| CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 54.75 |
| NITRATOS (mg/L) | 5.27 |
| SULFATOS (mg/L) | 6.38 |
| CLORUROS (mg/L) | 25.00 |
| DUREZA TOTAL (mg/L) | 437.42 |

Sobre la base de los resultados obtenidos en la etapa de la caracterización físico-química se concluyo que los contaminantes a los cuales se tiene que reducir sus niveles de concentración son el pH y la dureza total para los tanques de almacenamiento. Los valores exceden la Norma Salvadoreña Obligatoria para la Calidad del agua Potable(NSO #01ES/2000) para estos parámetros.

El objetivo de las pruebas a nivel de laboratorio se centró en la reducción de los parámetros pH y Dureza total utilizando diversos materiales adsorbentes para seleccionar el material idóneo para disminuir la concentración de tales parámetros.

También es del interés en esta investigación evaluar el comportamiento de los materiales en la separación de los demás contaminantes analizados (Conductividad Eléctrica, NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), que a pesar de no exceder los límites permisibles establecidos por la NSO #01ES/2000 es necesario conocer la capacidad de remoción de cada material para estas sustancias químicas.

9.2 ANALISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE REMOCION

Los resultados obtenidos en el tratamiento del agua lluvia se analizaron de la siguiente forma :

- a) Se presentan en gráficas de barras los resultados obtenidos para cada contaminante :
1. Graficas de concentración del contaminante en el efluente de lecho adsorbente junto con el valor del afluente.
 2. Graficas del porcentaje de remoción (variación en el caso del pH y Conductividad eléctrica) en los materiales adsorbentes.

El porcentaje de remoción de un contaminante especifico para un volumen dado de agua lluvia que pasó en cada material viene definido por la ecuación 9.1 :

$$\% \text{ Remoción} = \left[\frac{Ca - Ce}{Ca} * 100 \right] M \quad (9.1)$$

$$M = \left(\frac{100 \text{ gr de material}}{\text{gr de material filtrante}} \right)$$

Donde :

Ca : Concentración del contaminante en el afluente.

Ce : Concentración del contaminante en el efluente.

El porcentaje de remoción se expresa en función del material utilizado, para ello se divide entre los gramos de material utilizado y se uniformiza para 100 gr de material utilizado.

b) Explicación del comportamiento visualizado de las gráficas de porcentaje de remoción, que consiste en determinar :

1. La columna que mejor trata al contaminante.
2. Grupo de columnas que tienen mejor rendimiento
3. Comparación del rendimiento para cada par de materiales comunes.
4. Cualquier otro fenómeno reconocible.

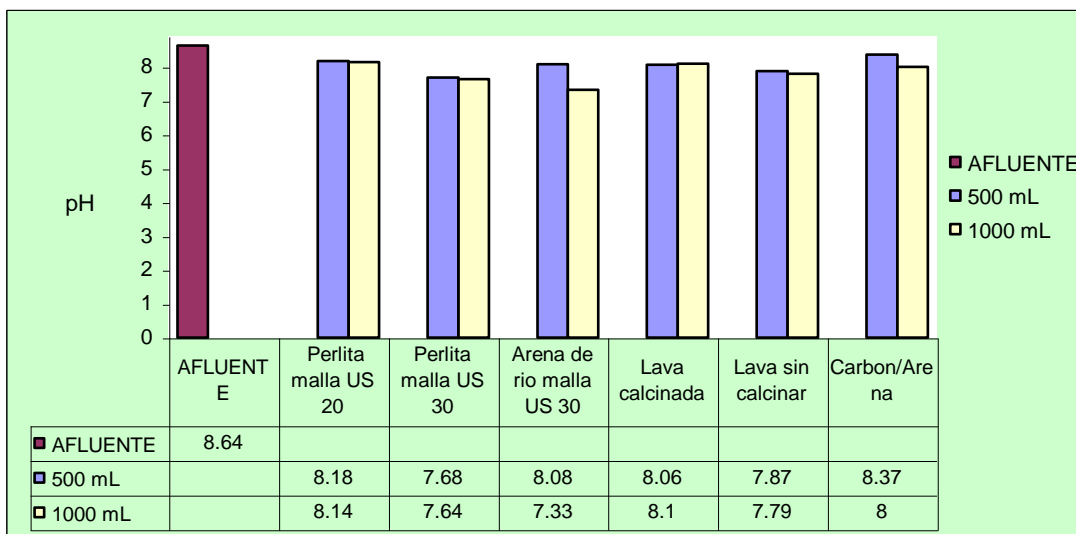
9.3 TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA , PARÁMETRO : pH

A continuación se describe el comportamiento de los materiales con respecto a la reducción del pH del agua lluvia.

9.3.1 pH EN LOS EFLUENTES

En la grafica 9.1 el pH a la salida de los materiales adsorbentes es siempre menor al pH del agua lluvia sin tratar, esto indica que todos los materiales son efectivos en cierto grado, en el ajuste del pH del agua lluvia.

GRAFICA 9.1: pH EN LOS EFLUENTES A 500 mL y 1000 mL DE AGUA TRATADA



9.3.2 PORCENTAJE DE REDUCCION DEL pH

El análisis de las graficas de porcentaje de reducción llevan a las siguientes observaciones (gráficas 9.2 y 9.3):

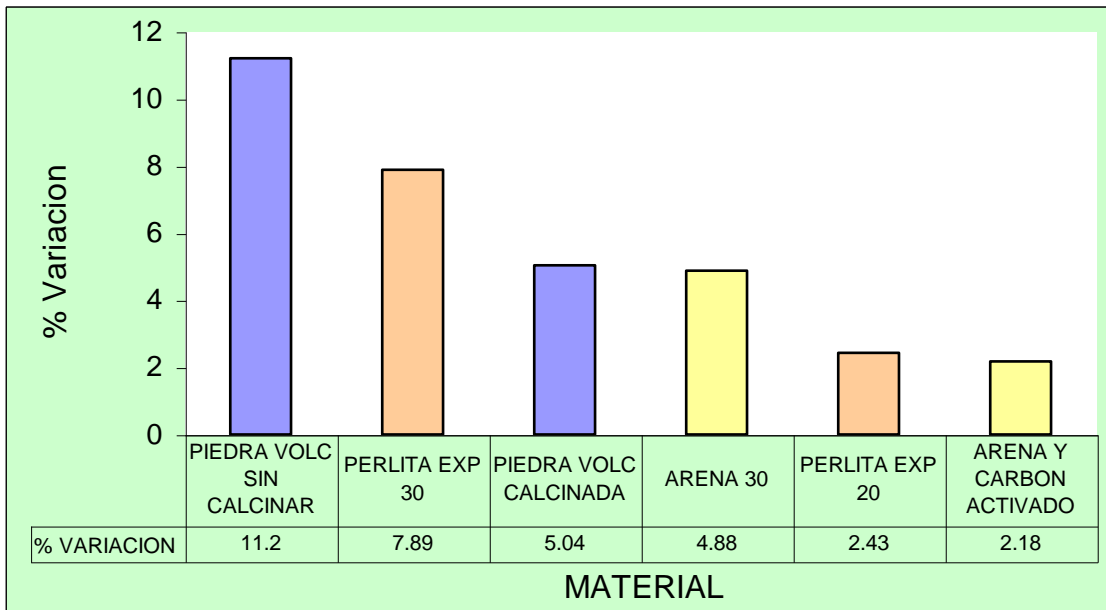
1. La columna de piedra volcánica sin calcinar y perlita malla 30 aparecen entre los primeros tres materiales más efectivos, este comportamiento se repite a 500 mL y a 1000 mL.
2. Se realizó la codificación de los materiales en colores en las gráficas 9.3 y 9.4 con el objetivo de observar el orden de mayor a menor capacidad de remoción entre cada par de columnas de igual material , (los pares de columnas son : perlita malla 20,perlita malla 30 ; arena malla 30,mezcla arena y carbón activado ; piedra volcánica calcinada, piedra volcánica sin calcinar).

De aquí que la perlita malla 30 es más efectivo que la perlita e malla 20, la columna de arena malla 30 es más efectivo que la mezcla de arena y carbón activado y el filtro de piedra volcánica sin calcinar es más efectivo que la piedra volcánica calcinada.

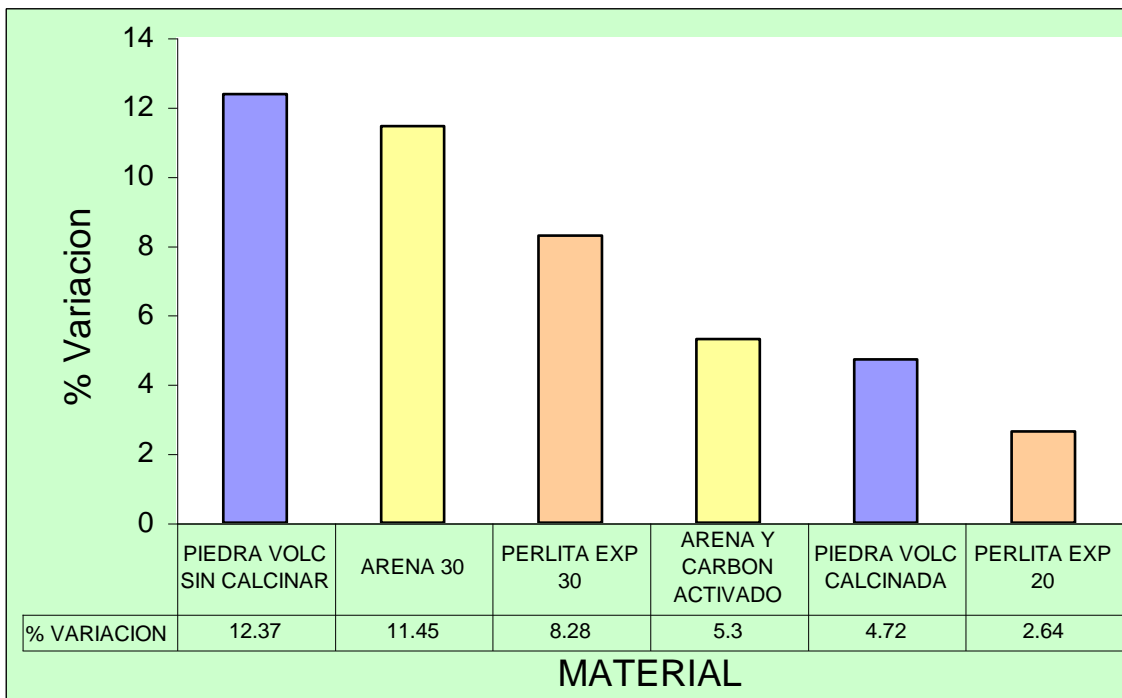
Este comportamiento es constante al volumen de agua lluvia .

3. La columna de piedra volcánica sin calcinar muestra el mejor porcentaje de reducción del pH.

GRAFICA 9.2 : COLUMNA QUE MEJOR REDUCE EL pH A 500 mL



GRAFICA 9.3: COLUMNA QUE MEJOR REDUCE EL pH A 1000 mL



9.4 TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA, PARÁMETRO : CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

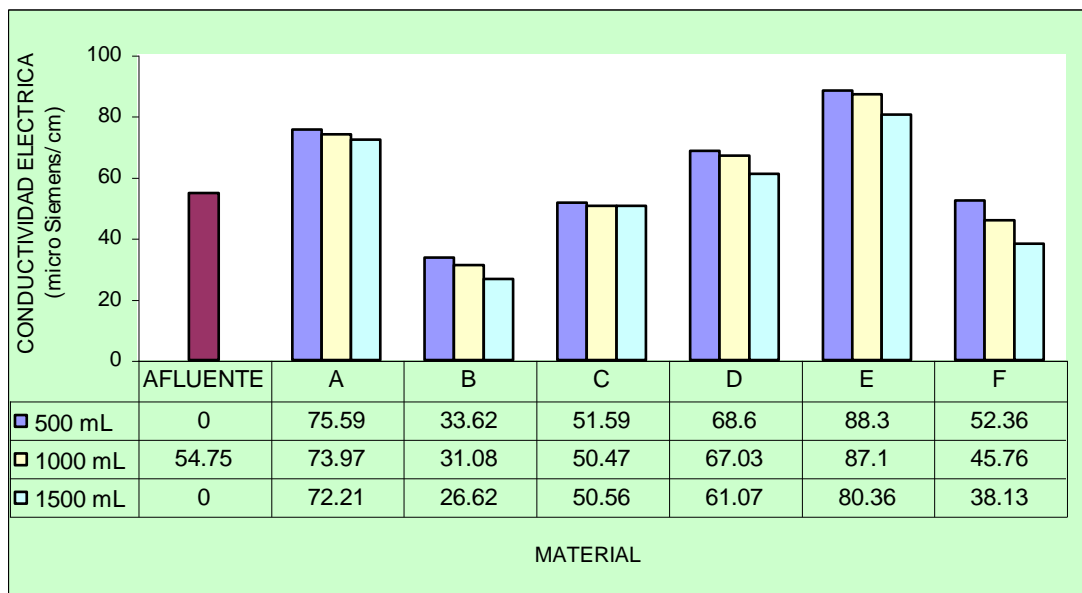
El comportamiento observado en las columnas revela marcadas diferencias de los valores de Conductividad Eléctrica (C.E.) de cada columna.

Las columnas : perlita de malla US 20 , piedra volcánica calcinada, arena y carbón presentaron valores mayores de C.E. en el afluente cuando se trataron los 500 mL. El comportamiento se mantuvo durante toda la prueba. De estos resultados se concluye que los materiales estaban contaminados con sustancias químicas que aumentaron la C.E. del agua lluvia tratada; lo cual se observa en las graficas 9.5, 9.6, y 9.7.

9.4.1 CONDUCTIVIDAD ELECTRICA EN LOS EFLUENTES

Como se observa en la gráfica 9.4, en la mayoría de los efluentes, la C.E. fue mayor que en el afluente.

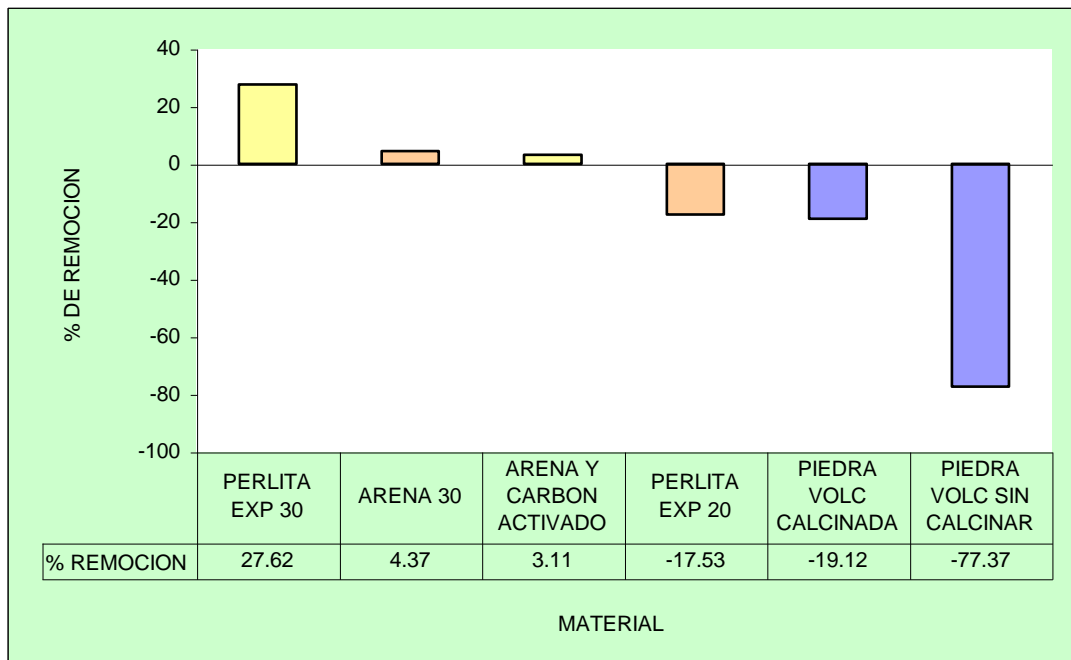
GRAFICA 9.4 CONDUCTIVIDAD ELECTRICA EN LOS EFLUENTES.



9.4.2 PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE C.E DE CADA MATERIAL

Las columnas de perlita malla US 30, arena de río malla US 30 y carbón activado / arena; presentaron en los efluentes valores de C.E menores al afluente(54.75 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a 500 mL (grafica 9.5) presentando porcentajes promedios de reducción de 27.62 %, 4.37 %, 3.11 % .

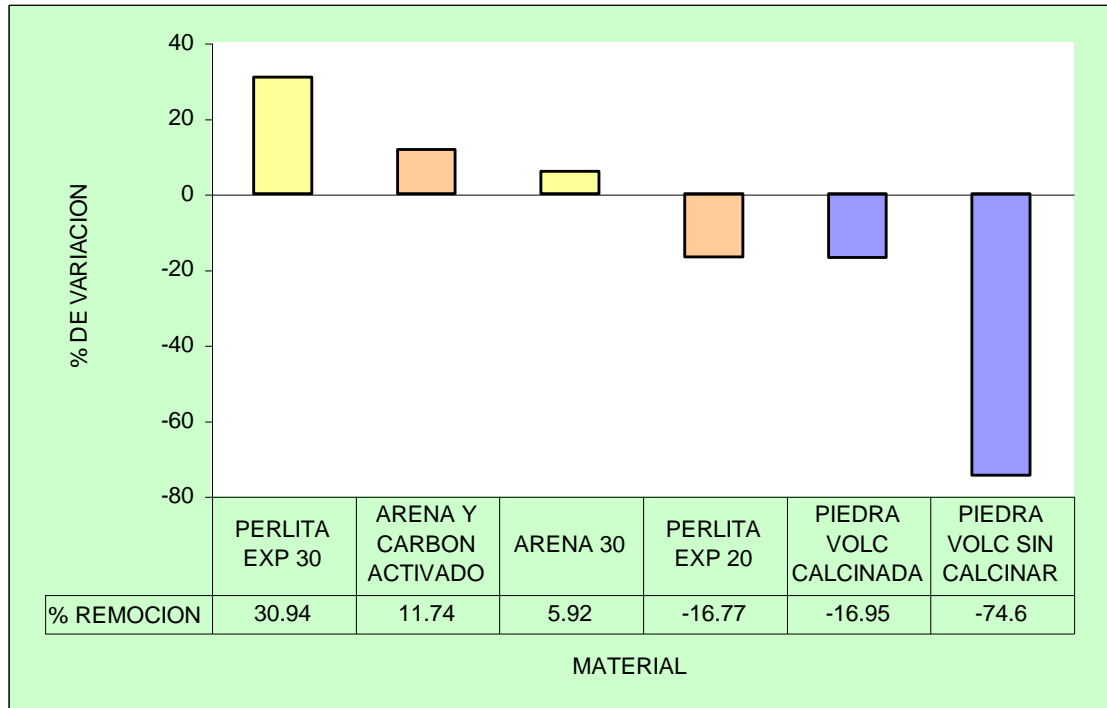
GRAFICA 9.5: COLUMNA QUE MEJOR REDUCE LA C.E. A 500 mL



En la gráfica 9.6 a 1000 mL de volumen de agua lluvia, la columna de perlita de malla US 30 aumentó su porcentaje de reducción a 30.94 %.

la columna de arena / carbón presentó un aumento significativo en el porcentaje de reducción hasta un valor de 11.74 %, mientras la columna de arena malla US 30 tuvo un aumento en su porcentaje de remoción a 5.92% como lo presenta la grafica.

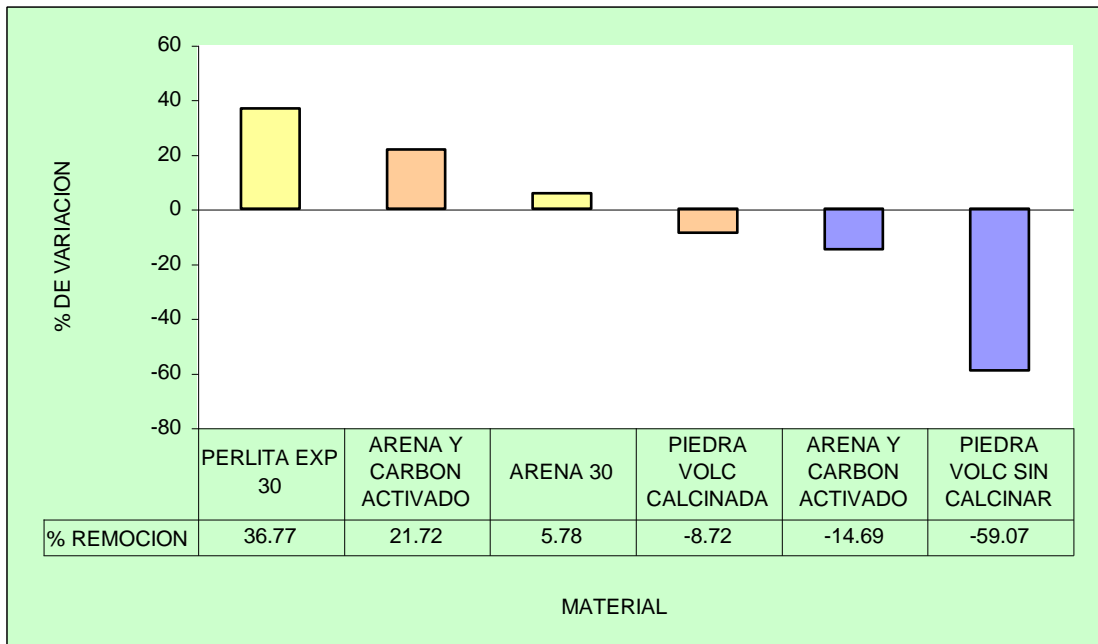
GRAFICA 9.6: COLUMNA QUE MEJOR REDUCE LA C.E. A 1000 mL



El comportamiento cuando se había tratado un acumulado de 1500 mL de agua lluvia como se observa en la grafica 9.13 se mantiene siendo la columna de perlita malla 30 la que presenta el mayor porcentaje de reducción de C.E a 36.77 %.

la columna de arena / carbón casi duplicó su porcentaje de reducción hasta 21.72%; por otro lado la columna de arena malla 30 mantuvo relativamente su porcentaje de reducción en 5.78%

GRAFICA 9.7: COLUMNA QUE MEJOR REDUCE A 1500 mL



9.5 TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA ,PARÁMETRO : CONCENTRACION DEL ION NITRATO EN mg/L

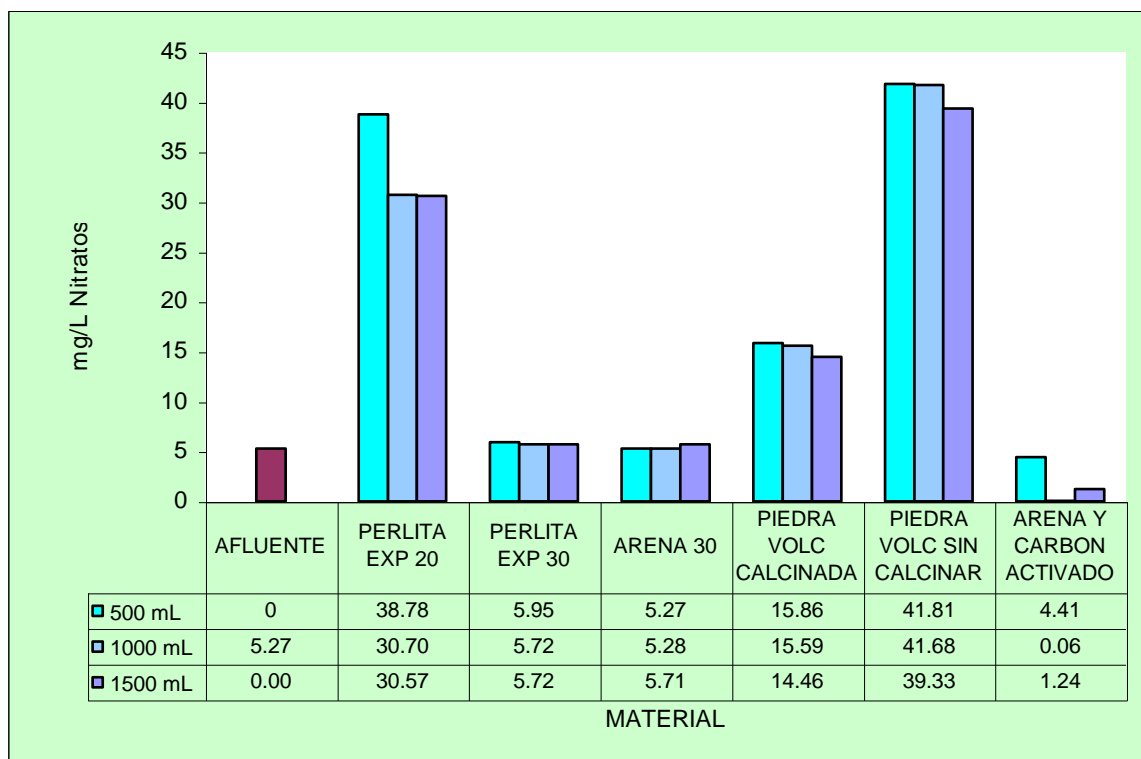
La prueba a nivel de laboratorio que se realizó para evaluar las capacidades de los diferentes materiales para la separación de iones nitratos del agua lluvia presento los siguientes resultados:

9.5.1 CONCENTRACION DEL ION NITRATO EN EL EFLUENTE

En la gráfica 9.8 las columnas de perlita malla 20, piedra volcánica calcinada y piedra volcánica sin calcinar reportaron valores de concentración de nitratos en los efluentes mayores al agua lluvia que inicialmente entraba a cada filtro cuya concentración es de 5.27 mg/L.

Las columnas de perlita malla 30 y arena malla 30 presentan concentraciones en los efluentes similares a los afluentes con pequeños aumentos del orden de décimas los cuales pueden asumirse que tienen aproximadamente el mismo valor.

GRAFICA 9.8: CONCENTRACION DEL ION NITRATO EN EL EFLUENTE A DIFERENTES NIVELES DE VOLUMEN DE AGUA LLUVIA TRATADA



9.5.2 PORCENTAJE DE REMOCIÓN EN EL EFLUENTE

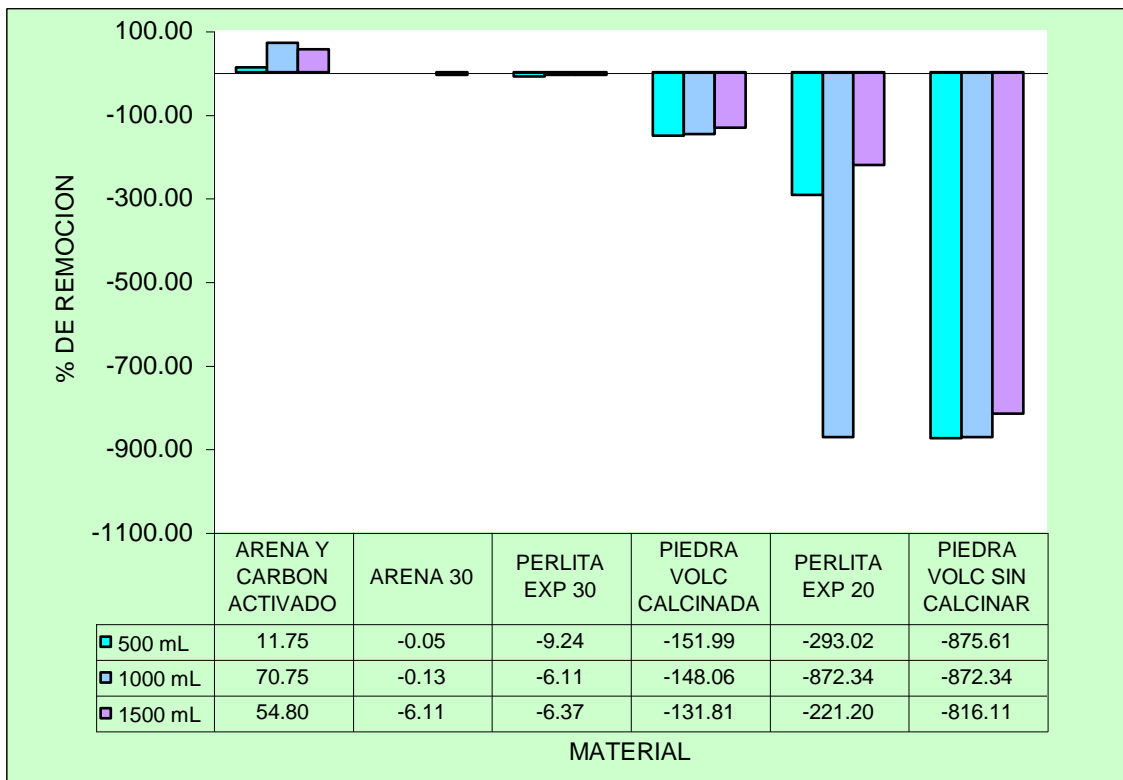
En la grafica 9.9 se presentan los porcentajes de remoción a diferentes niveles de volumen tratado, los resultados se han graficado en un solo plano ya que en general no se obtuvieron resultados satisfactorios. En esta grafica prevalecen los porcentajes de remoción negativos.

El comportamiento en las columnas: perlita malla 20, perlita malla 30, arena malla 30, piedra volcánica calcinada y sin calcinar se mantuvo constante a lo largo de la prueba tal como se puede observar en la grafica 9.9.

La columna de arena y carbón presentó excelentes propiedades para la separación de iones nitratos del agua lluvia que se trató a 500 mL de agua lluvia,

se tomaron muestras obteniéndose de los análisis una concentración promedio de 4.4 mg/L de nitrato con un porcentaje de remoción de 11.75 % según se observa en la grafica 9.9.

GRAFICA 9.9 : COLUMNA QUE MEJOR REMUEVE NITRATOS A DIFERENTES NIVELES DE VOLUMEN DE AGUA LLUVIA TRATADA



Al completarse 1000 mL de agua lluvia se obtuvo una concentración de 0.0615 mg/L de nitrato en el efluente siendo el valor mas bajo que redujo la columna de arena y carbón, con lo cual se llegó a reducir en un 70.75 % el contenido de iones nitratos en el agua lluvia que entró esta columna.

Cuando se analizaron las ultimas muestras a 1500 mL se reportó un valor 1.235 mg/L y un porcentaje de remoción del 54.8% en iones nitratos del afluente.

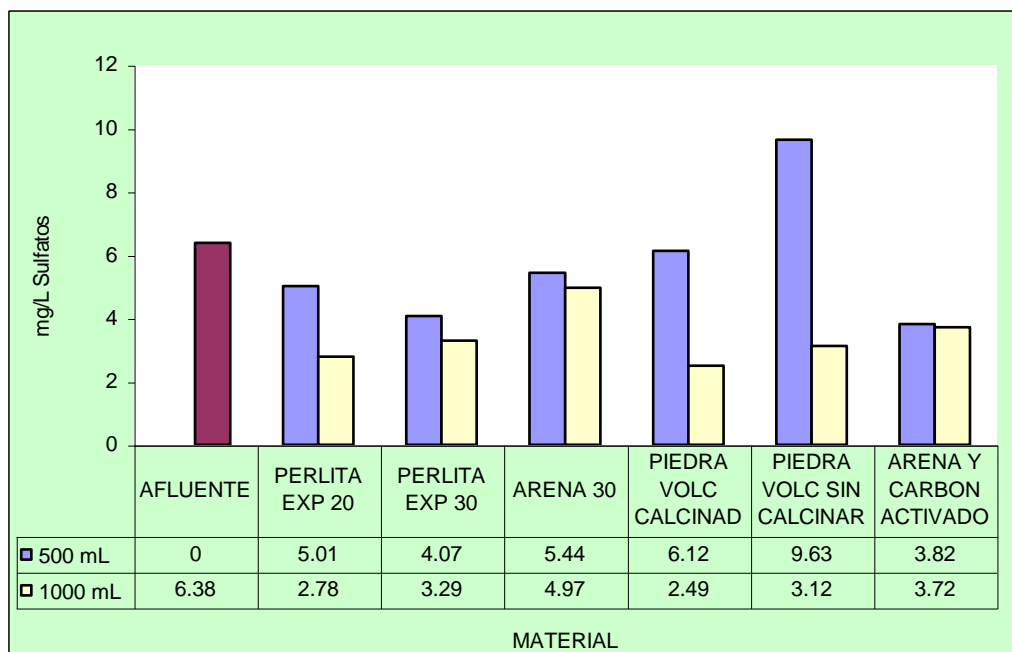
9.6 TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA , PARÁMETRO : CONCENTRACION DEL ION SULFATO EN mg/L

El porcentaje de remoción se eleva con el aumento del volumen de agua tratada en todos los materiales, excepto en la columna de piedra volcánica sin calcinar la cual mostró valores de concentración del efluente mayor que a la entrada y que lo atribuimos a una contaminación del material en el preexperimento.

9.6.1 CONCENTRACIÓN DEL ION SULFATO EN LOS EFLUENTES

La concentración del ion sulfato en el efluente se redujo con el aumento del volumen tratado de agua lluvia, gráfica 9.10.

GRAFICA 9.10: CONCENTRACION DEL ION SULFATO EN LOS EFLUENTES



9.6.2 PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE SULFATOS EN EL EFLUENTE

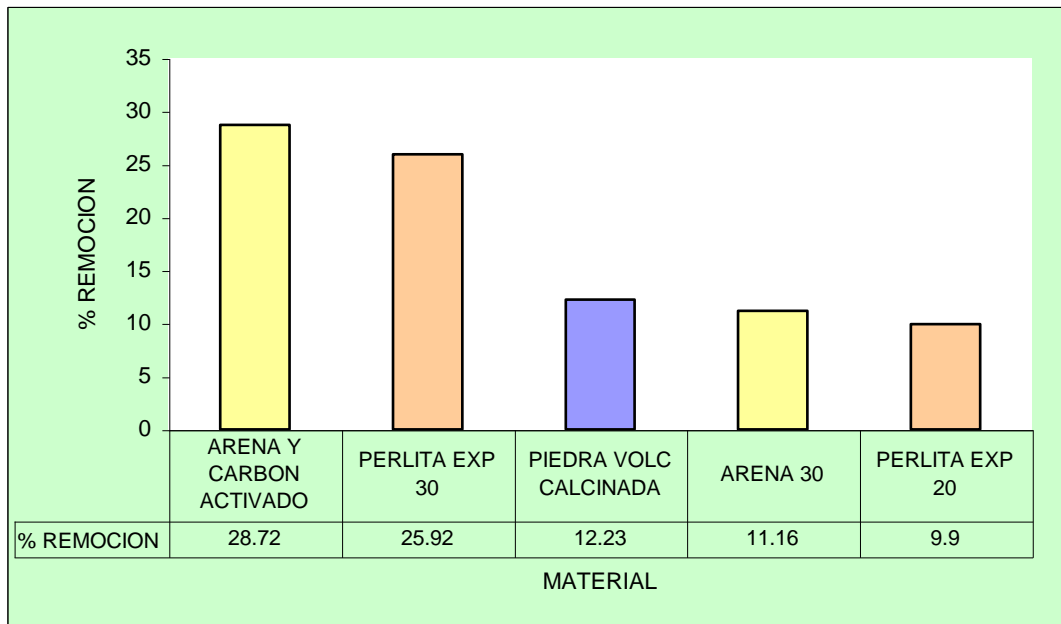
El análisis de las graficas de % de remoción llevan a las siguientes conclusiones :

1. La columna de piedra volcánica calcinada y de perlita malla 30 aumentan su efectividad con el volumen del agua tratada y son los que mejor respuesta dieron en el tratamiento de agua lluvia. La columna de arena y carbón aunque aparece como el mejor de los materiales a 500 mL, pero reduce su capacidad con el aumento del volumen de agua tratada.
2. La capacidad de remoción para el par de columnas de igual material es igual que en el caso del pH es decir, se mantiene el orden : perlita malla 30 mayor que la perlita malla 20 y además para el par : arena / carbón y arena malla 30, la columna combinada de arena / carbón es siempre mayor que la de arena malla 30.
3. La columna de piedra volcánica calcinada y la de perlita malla 30 alcanzaron los mejores % de remoción y aumentan este valor a medida que aumenta el volumen de agua lluvia, de estos, la columna de piedra volcánica calcinada alcanzó el mayor valor de 46.19% de remoción de iones sulfatos.

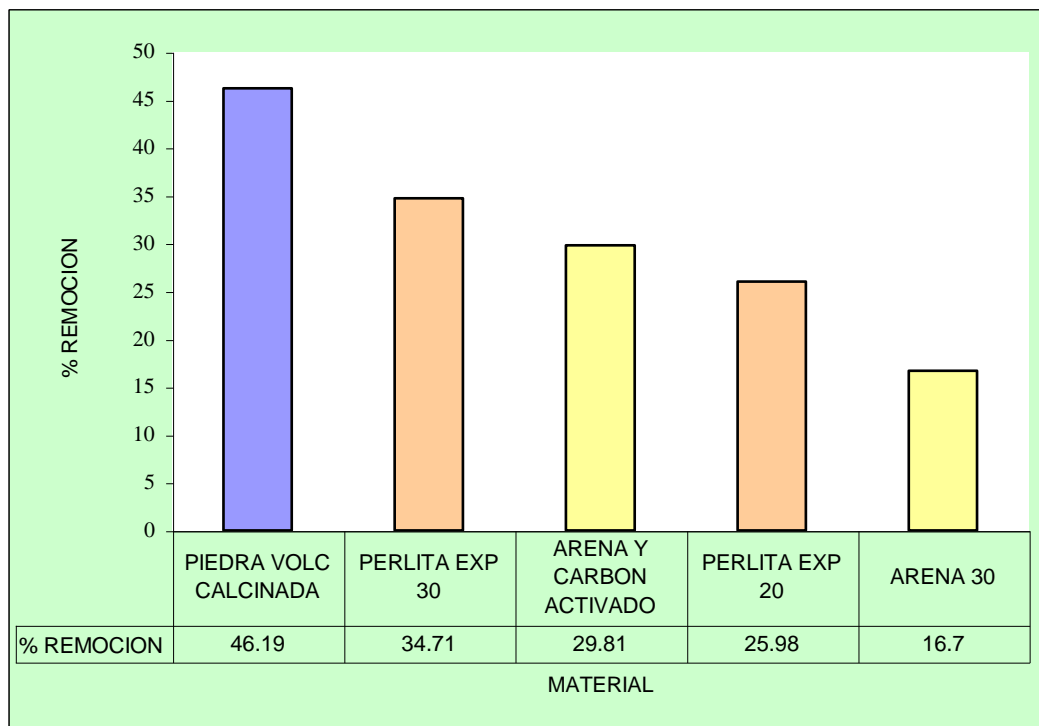
La columna de perlita malla 20 y la de arena malla 30 también tienden a mejorar el proceso de remoción pero en menor grado.

La columna de arena y carbón no muestra una tendencia de su respuesta (datos anormales).

GRAFICA 9.11: MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE SULFATOS A 500 mL



GRAFICA 9.12 MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE SULFATOS A 1000 mL



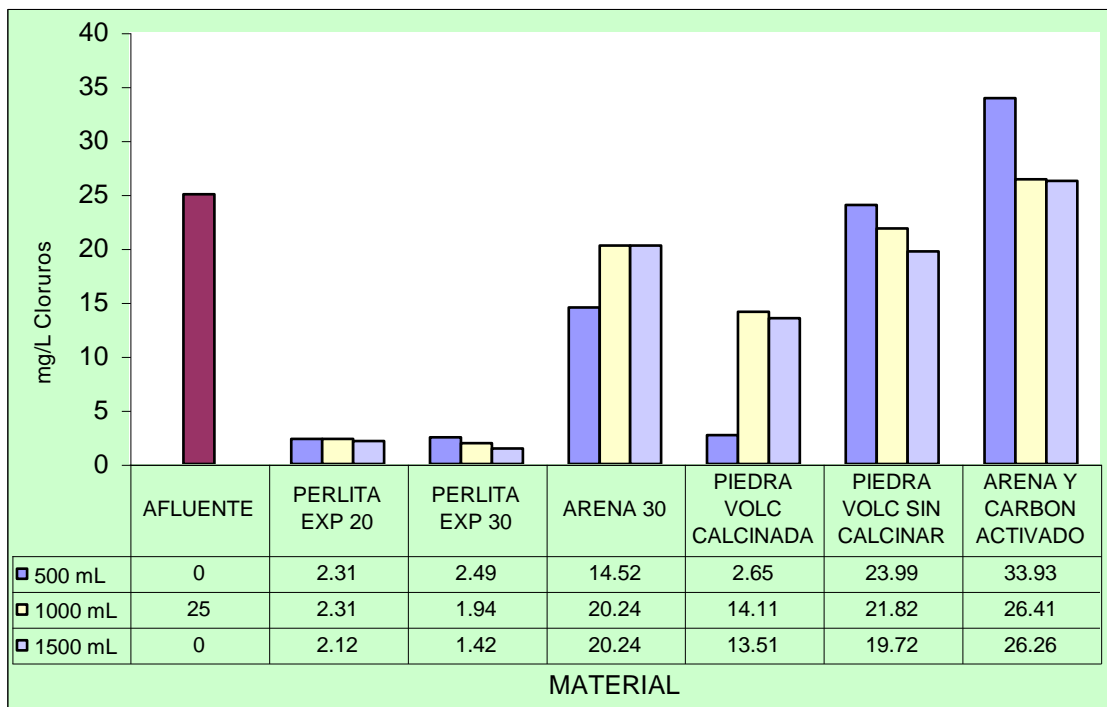
9.7 TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA , PARÁMETRO : CONCENTRACION DEL ION CLORURO.

Las columnas que contienen perlita y la columna de piedra volcánica calcinada tienen los mejores rendimientos a 500, 1000 y 1500 mL. A 500 mL la piedra volcánica calcinada arroja el mejor rendimiento, pero este valor se reduce al aumentar el volumen de agua lluvia tratada. Las columnas que contienen perlita aumentan el % de remoción con el volumen de agua lluvia tratada.

9.7.1 CONCENTRACIÓN DEL ION CLORURO EN LOS EFLUENTES

La concentración de cloruros en el efluente se redujo en el caso de la perlita expandida, como se muestra en la gráfica 9.13.

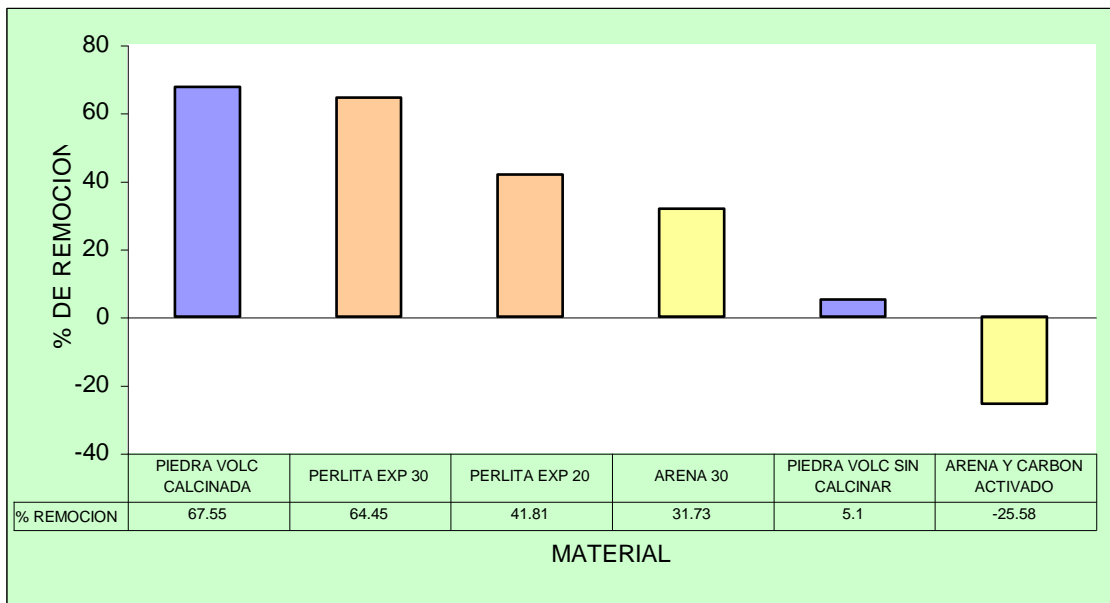
GRAFICA 9.13 : VARIACIÓN DEL ION CLORURO EN LOS EFLUENTES



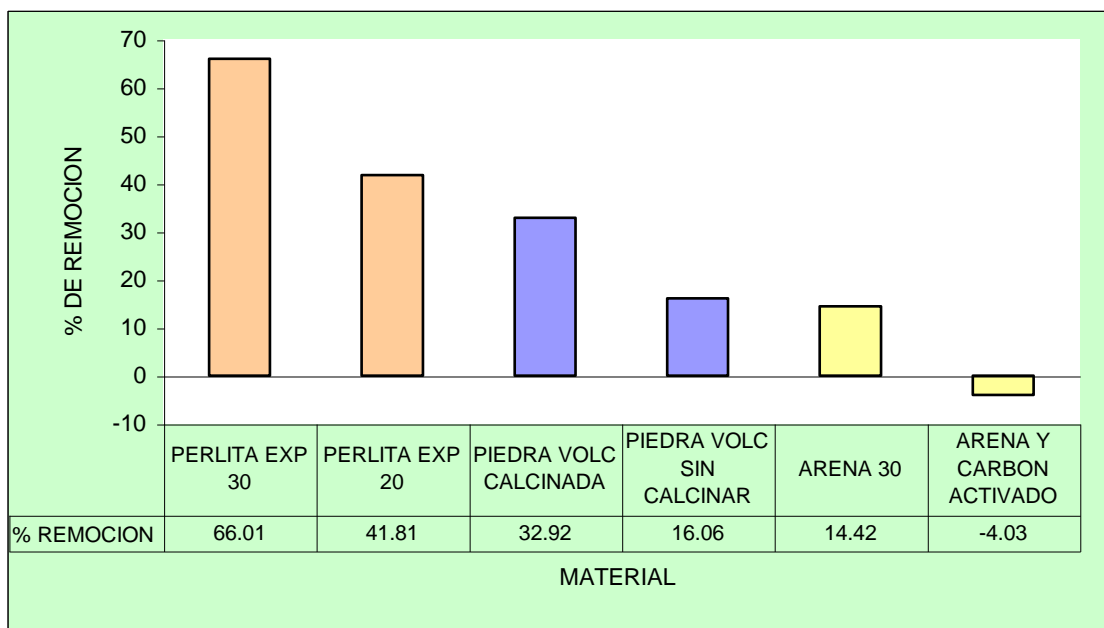
9.7.2 PORCENTAJE DE REMOCIÓN

La columna de piedra volcánica sin calcinar también mejora el proceso de remoción con el volumen, pero lo hace en menor grado en comparación con los otros materiales (gráficas 9.14, 9.15 y 9.16).

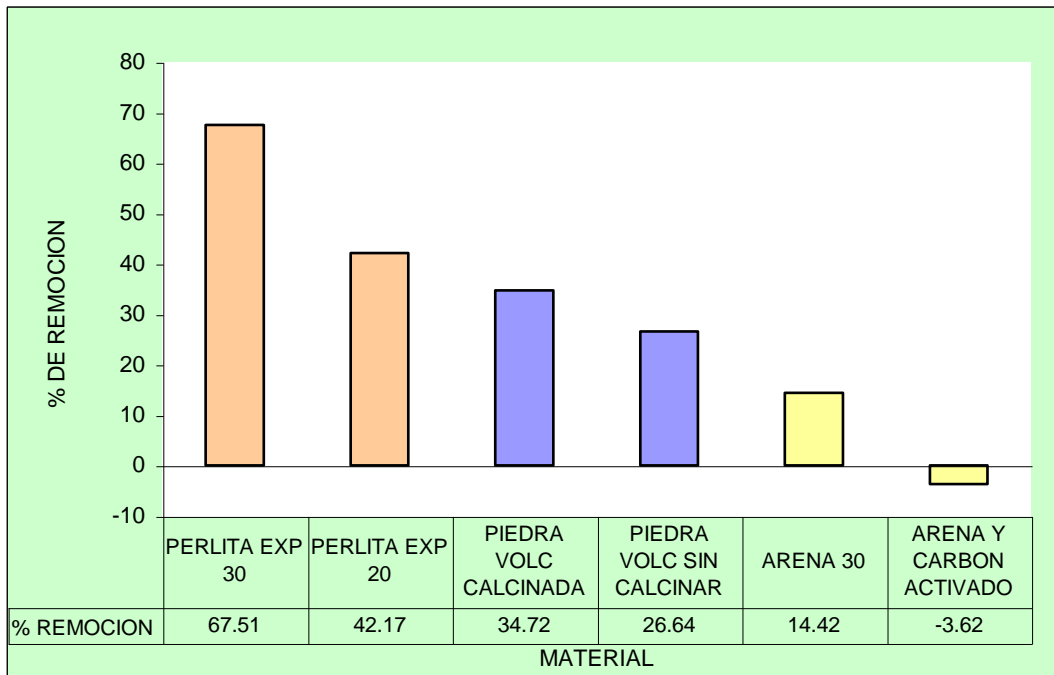
GRAFICA 9.14: MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE CLORURO A 500 mL



GRAFICA 9.15: MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE CLORURO A 1000 mL



GRAFICA 9.16: MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE CLORUROS A 1500 mL



Al igual que en el análisis de pH y dureza, la columna de perlita malla 30 tiene mejor rendimiento que la perlita malla 20.

La columna de piedra volcánica calcinada a la piedra sin calcinar en los diferentes niveles de volumen. La columna de perlita malla 30 dio los mejores resultados : 67.51% de remoción a 1500 mL.

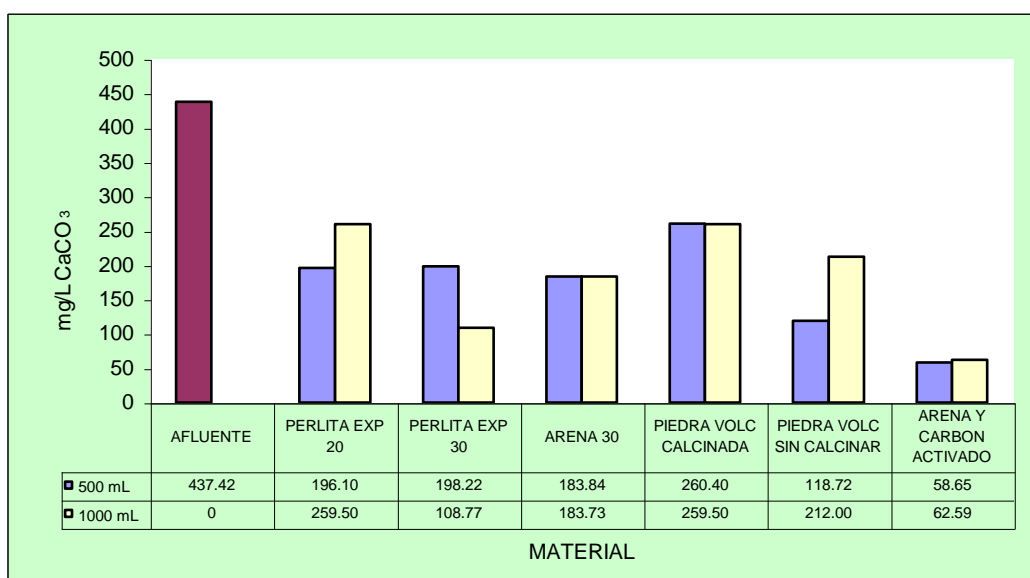
9.8 TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA, PARÁMETRO : DUREZA TOTAL EXPRESADA COMO mg/L de CaCO₃

Todos los materiales redujeron la dureza, la columna combinada de arena y carbón activado reportó los mejores resultados como se muestra en la grafica 9.17.

9.8.1 DUREZA TOTAL EN LOS EFLUENTES

Al analizar las columnas por pares se observa que los comportamientos son iguales a ambos volúmenes de flujo (500 y 1000 mL) y además este comportamiento es similar al observado en el análisis de pH, y sulfatos excepto para las columnas de arena y carbón y de arena malla 30, es decir, la perlita malla 30 es mejor que la perlita malla 20, la columna de arena y carbón es mejor que la de arena malla 30 y la columna de piedra volcánica sin calcinar es mejor que de piedra volcánica calcinada.

GRAFICA 9.17 : VARIACION DE LA DUREZA EN LOS EFLUENTES



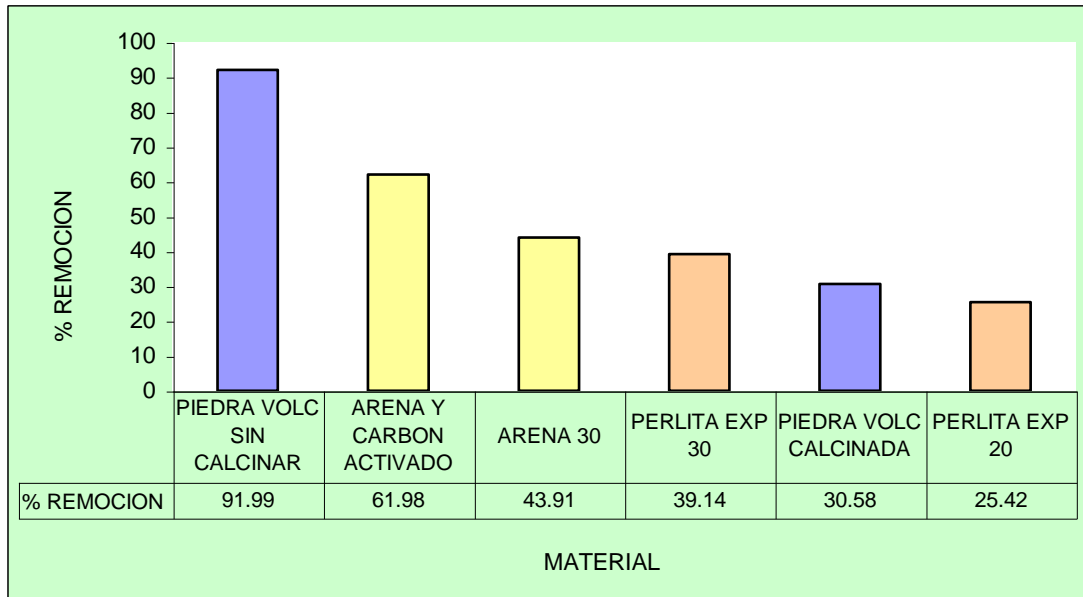
9.8.2 PORCENTAJE DE REMOCIÓN

En la gráfica 9.18 ,a 500 mL, las columnas de piedra volcánica sin calcinar y la combinada de arena y carbón activado presentan los porcentajes de remoción más altos entre las seis columnas, con 91.99% y 61.98% respectivamente.

Las columnas de perlita malla 30 y arena malla 30 presentan porcentajes significativos siendo la de arena malla 30 ,la de porcentaje mayor que la de perlita con 43.91% y la perlita malla 30 con 39.14%, mientras que las columnas de

perlita malla 20 y de piedra volcánica calcinada presentan los porcentajes menores entre las seis columnas.

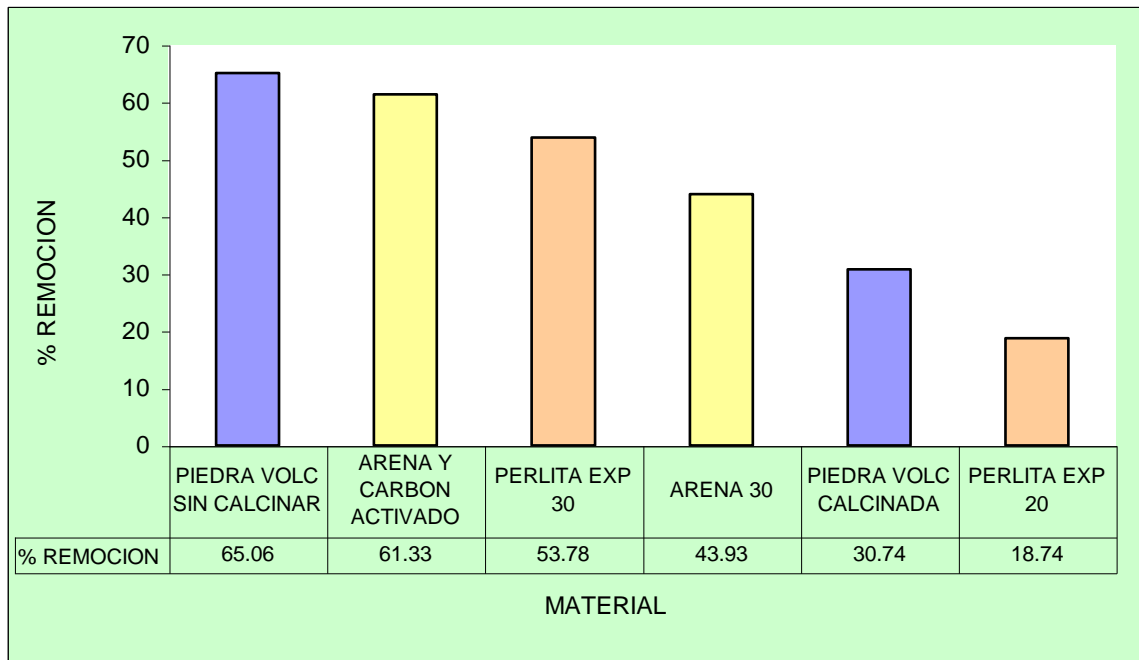
GRAFICA 9.18: MATERIAL QUE MEJOR REDUCE LA DUREZA A 500 mL



En la gráfica 9.19 el comportamiento al analizar muestras de cada columna cuando se ha pasado un volumen de 1000 mL sufre pequeños cambios; se puede mencionar que las columnas de piedra volcánica sin calcinar y arena y carbón siguen siendo los de mayor porcentajes de remoción pero la diferencia entre ambos es pequeña notándose un descenso en la remoción de dureza total a 65.06 % para la piedra volcánica sin calcinar, mientras que la columna de carbón y arena mantiene casi constante su porcentaje de remoción en 61.33%, esta estabilidad de la columna de carbón y arena nos lleva a reconocerla como la más adecuada.

La columna de perlita malla 30 presenta un mayor porcentaje que la columna de arena malla 30, pero la diferencia entre ambas es pequeña. El porcentaje de remoción de estas columnas es menor que el de las columnas de piedra volcánica sin calcinar y de arena y carbón.

GRAFICA 9.19 : MATERIAL QUE MEJOR REDUCE LA DUREZA A 1000 mL



9.8 ANALISIS DEL DESEMPEÑO DE LAS COLUMNAS MAS EFECTIVAS

El análisis de las columnas que fueron efectivas en el tratamiento de agua lluvia consiste en :

1. Especificar la columna que mejor remueve o reduce al contaminante.
2. Grupo de columnas que tienen mejor rendimiento.
3. Comparación del rendimiento para cada par de materiales comunes.
4. Cualquier otro fenómeno reconocible.
5. Comparación del comportamiento de la columna que mejor funciona para la variable estudiada con otras variables analizadas para la misma columna.

9.9.1 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA COLUMNA DE PERLITA EXPANDIDA MALLA 30

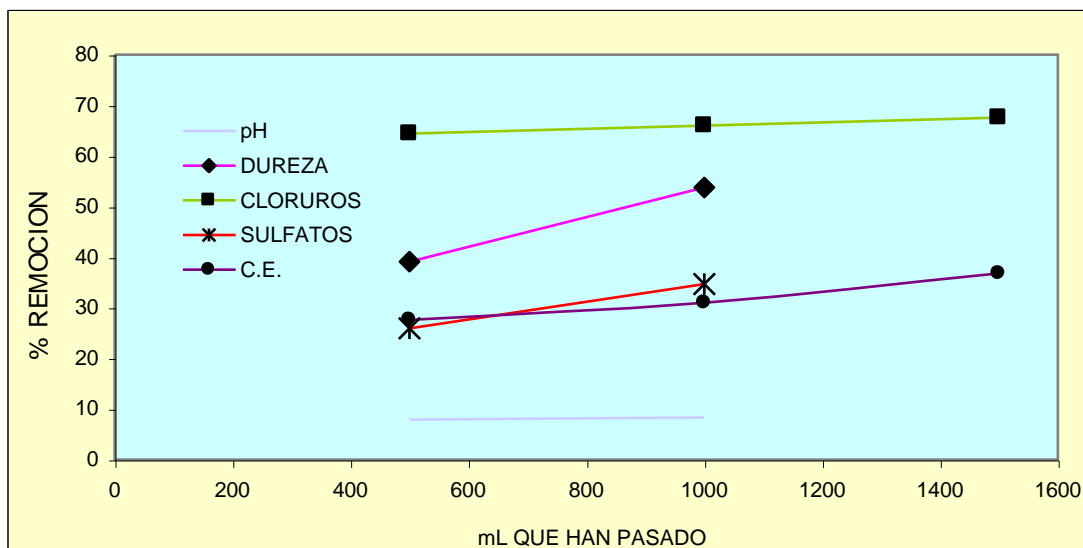
Las curvas de remoción de contaminantes de esta columna muestran que el porcentaje de remoción tiende a aumentar con el volumen de agua lluvia tratada.

9.9.1.1 COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD EN EL EFLUENTE DE LA COLUMNA DE PERLITA EXPANDIDA MALLA 30 CON OTROS CONTAMINANTES

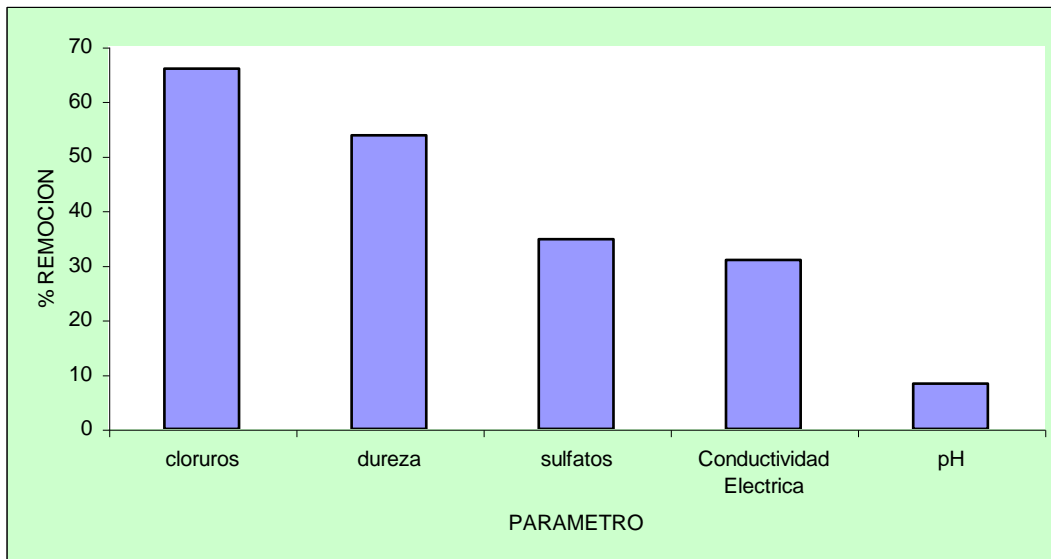
Esta columna puede considerarse adecuada para el tratamiento de agua lluvia ya que los porcentajes de remoción están arriba del 20 % para 1500 mL a excepción de la curva de variación de pH que revela la baja efectividad de esta columna para ajustar el pH del agua lluvia tal como se observa en la grafica 9.20.

Hay que notar que a pesar de que si bien la perlita expandida malla 30 alcanzó el mayor porcentaje de reducción de la conductividad eléctrica , no es el parámetro físico-químico que mejor trata este filtro.(grafica 9.21)

GRAFICA 9.20: COMPARACIÓN DEL % DE REMOCION PARA EL FILTRO DE PERLITA MALLA 30



GRAFICA 9.21: PORCENTAJE DE REMOCIÓN, COLUMNA DE PERLITA
MALLA 30



9.9.2 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA COLUMNA DE PIEDRA VOLCÁNICA CALCINADA

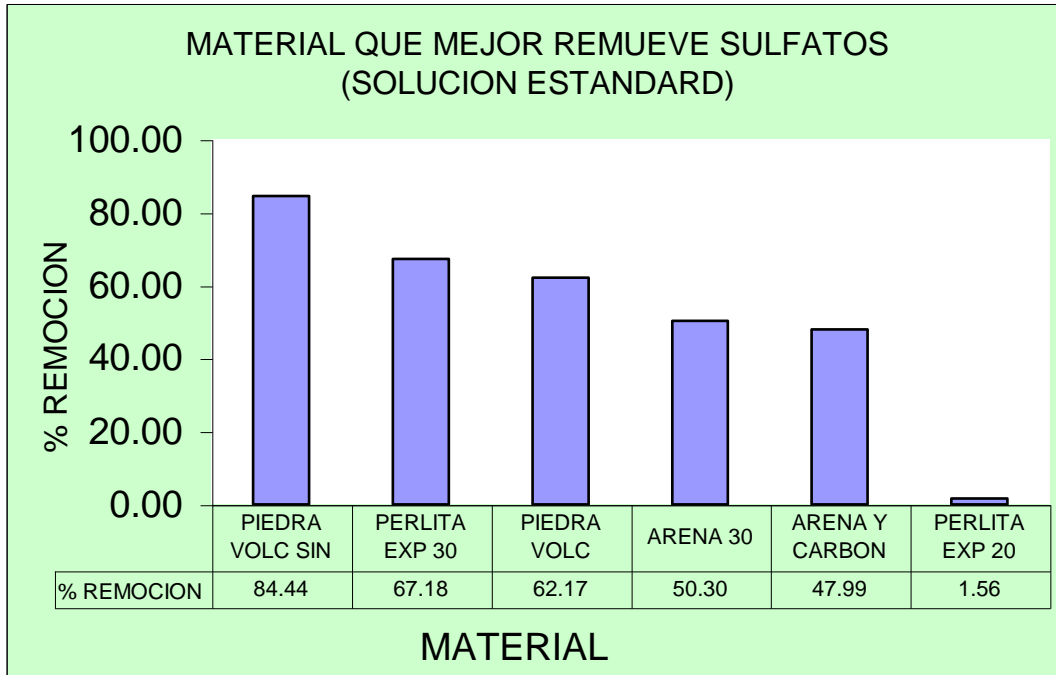
Se demostró que la presencia de otras especies en el afluente afecta el proceso de remoción.

9.9.2.1 PRESENCIA DE OTROS IONES

En el gráfico 9.22 la columna tiene un porcentaje de remoción del ión sulfato de 62.17 % en agua que contiene este ión como único contaminante. Este valor es mayor que el reportado para agua lluvia (46.19%).

Además, de los contaminantes que en esta investigación se trataron, el ión sulfato del agua lluvia es la especie que mejores resultados arroja este material según la grafica 9.24.

GRAFICA 9.22 : MATERIAL QUE MEJOR REMUEVE SULFATOS (SOLUCION ESTÁNDAR : Na₂SO₄ 25 mg/L)



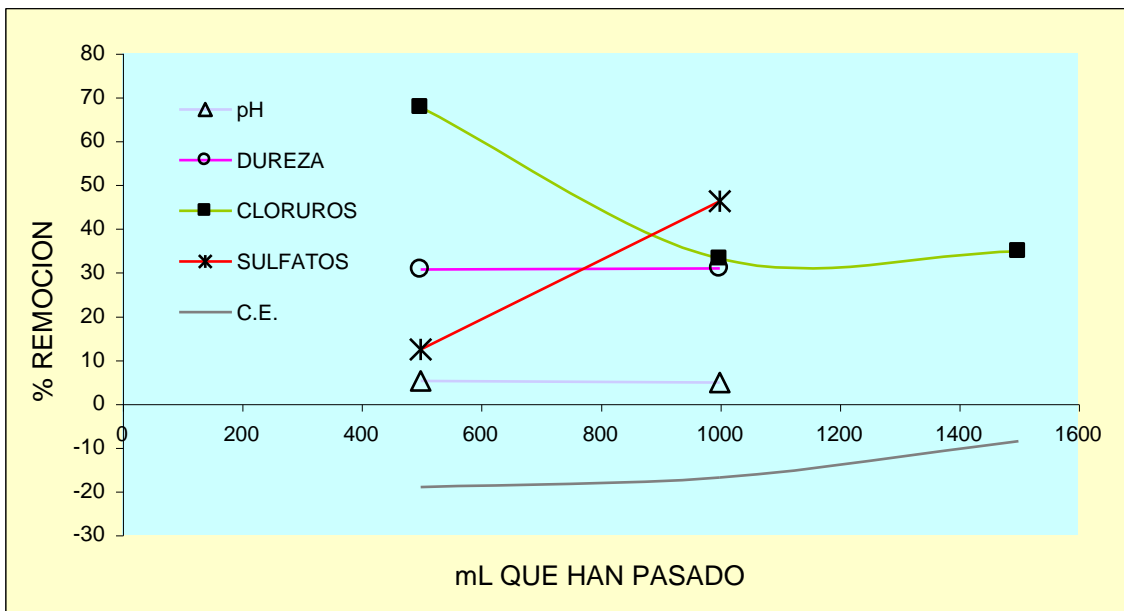
9.9.2.2 COMPORTAMIENTO DEL ION SULFATO DEL EFLUENTE CON OTROS CONTAMINANTES

Al observar la grafica 9.23 se observa que la conductividad eléctrica presenta un valor de porcentaje de remoción negativo a la salida de esta columna, lo cual indica que el valor de la conductividad aumentó en el efluente.

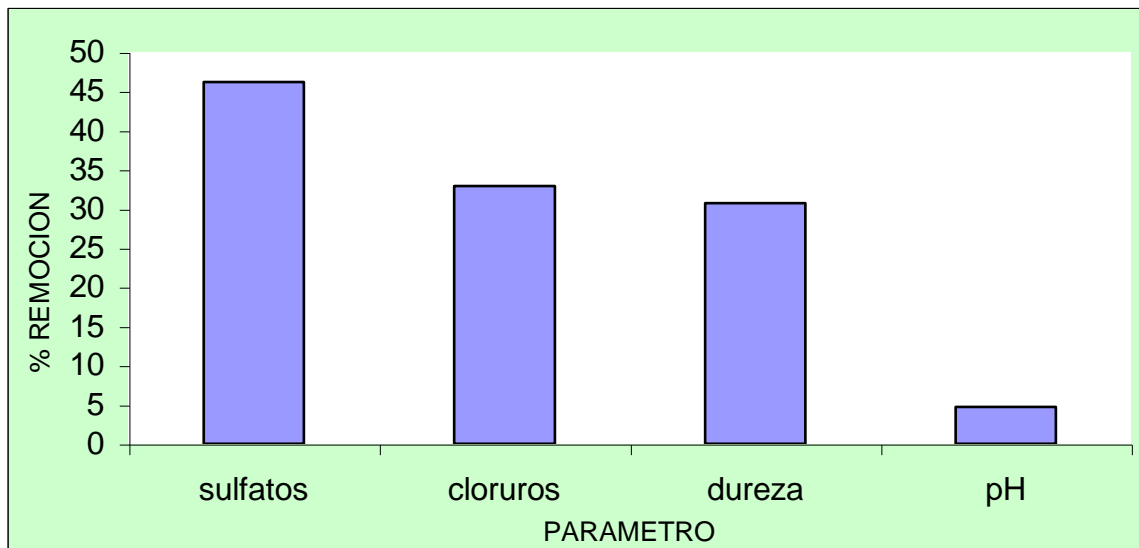
Al analizar este comportamiento, hay que tomar en cuenta que la concentración del ión sulfato en el agua lluvia es pequeño (6.38 mg/L) y siendo separado este ión muy rápidamente por el material adsorbente, la curva de conductividad parece no verse afectada por esta cualidad del material ya que si el sulfato se remueve o no ,su valor es siempre bajo de modo que el valor de la conductividad eléctrica lo aportan otros iones que si están a concentraciones relativamente elevadas.

Al observar la curva de cloruros, puede verse que la concentración de este ión es alta cuando el material reduce su capacidad de removerlo y este valor es alto en el afluente (25 mg/L), además, el material se contaminó con iones nitratos. Las dos observaciones anteriores indican que la presencia de iones negativos alta hace que el valor de conductividad sea alto.

GRAFICA 9.23: COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCION DE LA PIEDRA VOLCÁNICA CALCINADA



GRAFICA 9.24: PORCENTAJE REMOCIÓN, PIEDRA VOLCÁNICA CALCINADA



La curva de remoción de sulfatos concuerda con el porcentaje de remoción de esta columna en la grafica 9.24, el cual aparece como el mejor porcentaje de remoción en este material.

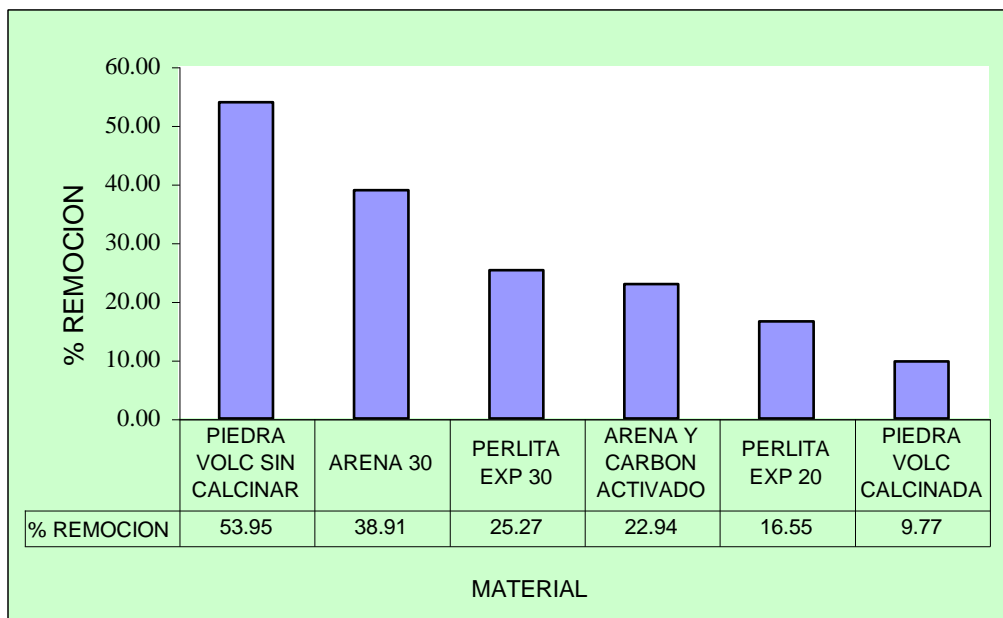
9.9.3 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA COLUMNA DE PIEDRA VOLCÁNICA SIN CALCINAR

Este material redujo el pH en un 11.2% y 12.37% a 500 mL y 1000 mL respectivamente, este es el mejor resultado del tratamiento.

9.9.3.1 PRESENCIA DE OTROS IONES

En el preexperimento se hizo pasar agua desmineralizada en cada material. De esta prueba se tiene que también este material es el mejor en reducir el pH del agua desmineralizada en un 53.94 % según la grafica siguiente :

GRAFICA 9.25 : MATERIAL QUE MEJOR REDUCE EL pH (SOLUCION DE CLORURO DE CALCIO)

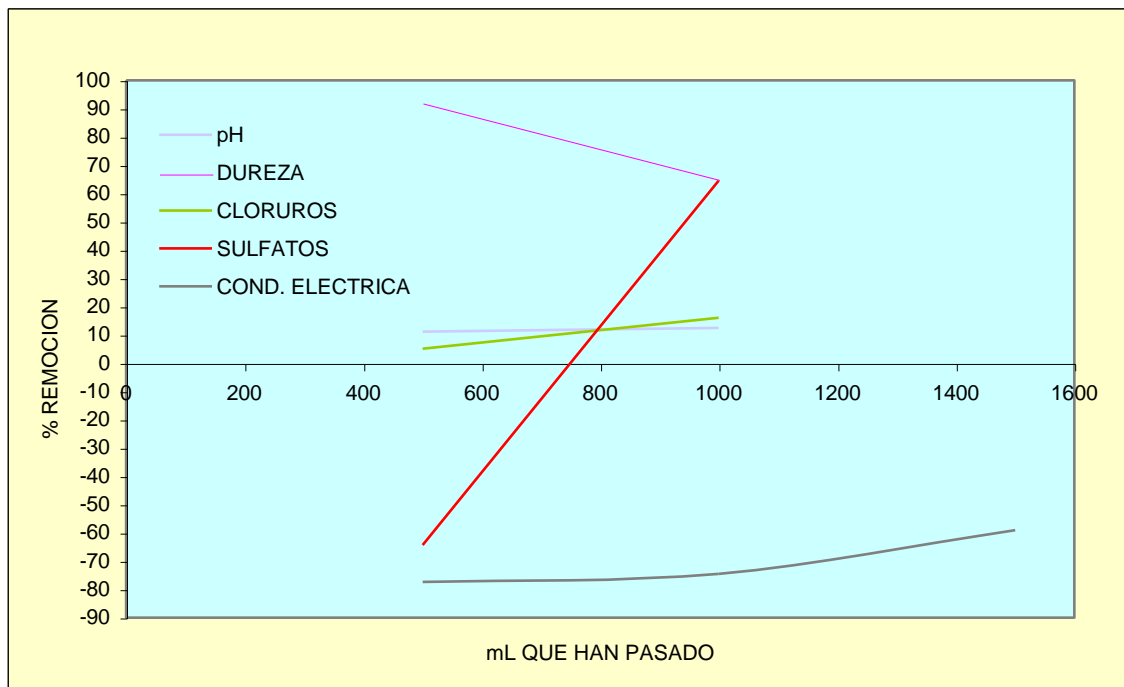


Estos resultados demuestran que la presencia de otros contaminantes en el agua a tratar reduce la efectividad del ajuste del pH en la piedra volcánica sin calcinar de un 53.94% a 12.37%.

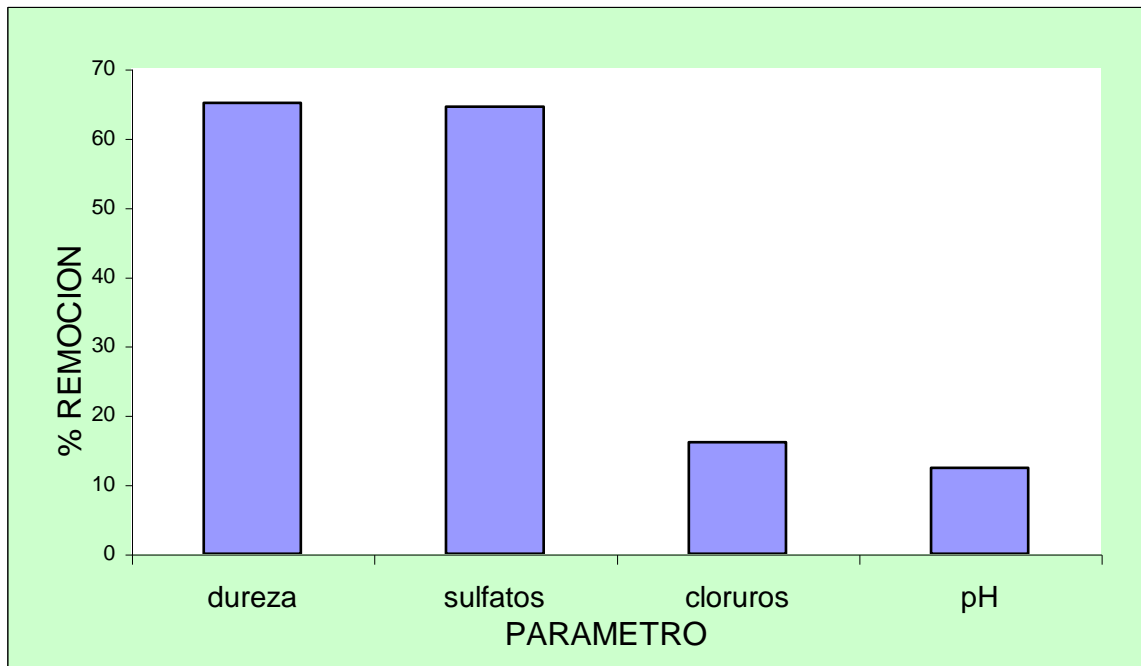
9.9.3.2 COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO DEL pH DEL EFLUENTE CON OTROS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Al aumentar el porcentaje de reducción del pH, el porcentaje de remoción de la dureza total disminuye (grafica 9.6). Esta columna trabaja mejor en la remoción de otros contaminantes, según gráfica 9.7. Nótese que si el pH es la variable que menos reduce y siendo este el material con mejor desempeño, se puede llegar a la conclusión que el pH del agua lluvia no ha recibido un ajuste significativo. Se logró llevar el pH al valor de 7.79 , el cual esta dentro de la NSO #01ES/2000 (6-8.5), pero el valor en el agua lluvia no estaba muy alejado del valor de la NSO #01ES/2000 (8.64).

GRAFICA 9.26: COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN LA PIEDRA VOLCÁNICA SIN CALCINAR.



GRAFICA 9.27 : PORCENTAJE DE REMOCION EN LA PIEDRA VOLCÁNICA SIN CALCINAR



9.10 ANÁLISIS DE LOS ANIONES EN LOS EFLUENTES

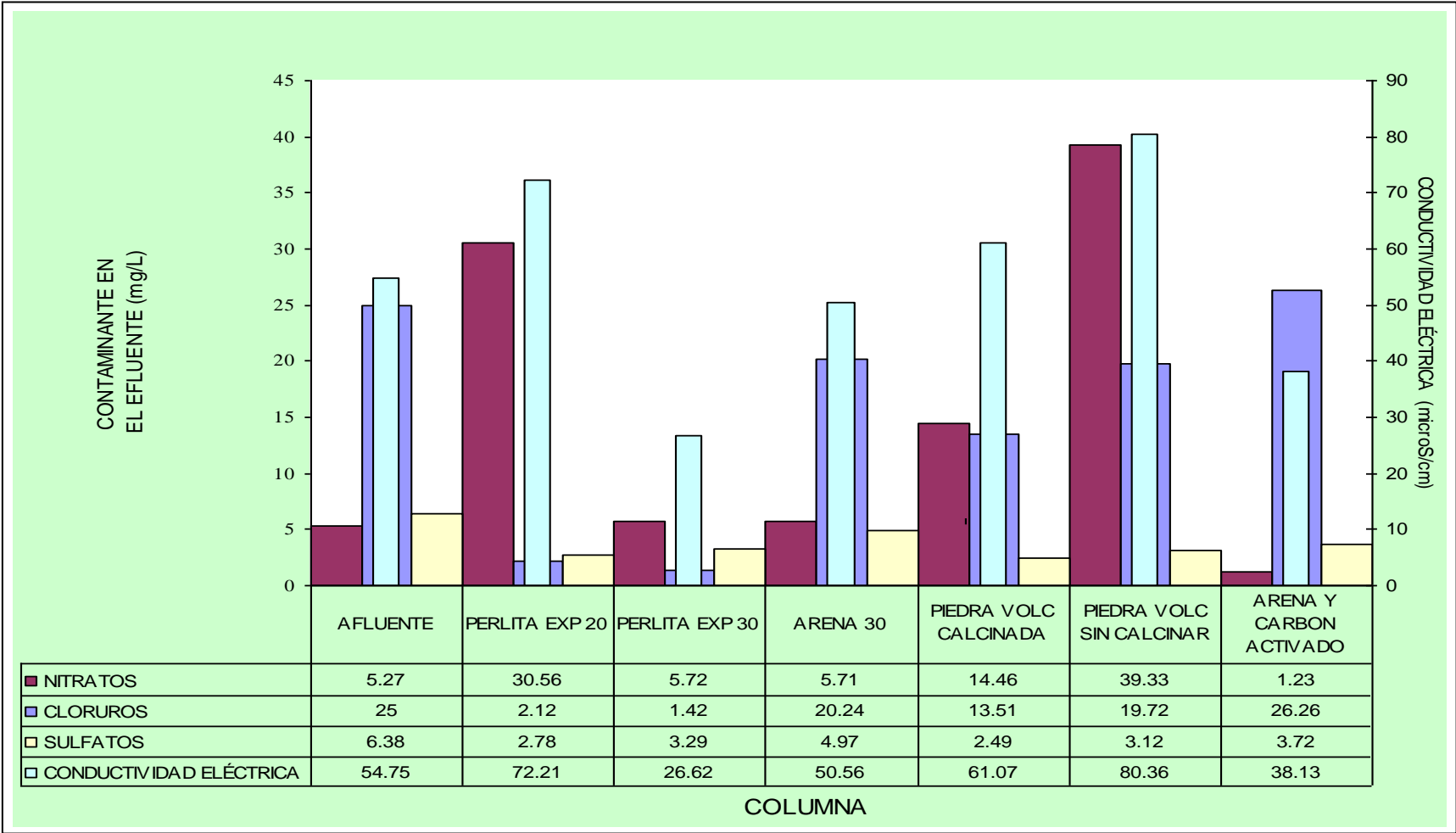
En la tabla 9.2 se listan los resultados del análisis de los efluentes para nitratos, sulfatos, cloruros y conductividad eléctrica. se ha preparado la información con el objeto para explicar la relación que se nota entre los iones nitratos y la conductividad eléctrica.

Nótese que cuando los nitratos aparecen como iones no reducidos, la conductividad es alta. Este fenómeno se presenta en la grafica 9.41.

TABLA 9.2 RELACION ENTRE IONES EN EL EFLUENTE

| FILTRO | Cl ⁻¹ | NO ₃ ⁻¹ | SO ₄ ⁻² | C.E. | Iones que se reducen | Iones que no se reducen |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|-------------------------------|
| | Afluente : 25 mg/L | Afluente : 5.27 mg/L | Afluente : 6.38 mg/L | Afluente : 54.75 μS/cm | | |
| Perlita expandida m 20 | 2.12 | 30.56 | 2.44 | 72.21 | Cl ⁻¹ , SO ₄ ⁻² | NO ₃ ⁻¹ |
| Perlita expandida m 30 | 1.42 | 5.72 | 4.97 | 26.62 | Cl ⁻¹ , NO ₃ ⁻¹ | SO ₄ ⁻² |
| Arena de rio m30 | 20.24 | 5.71 | 2.49 | 50.56 | NO ₃ ⁻¹ , SO ₄ ⁻² | Cl ⁻¹ |
| Piedra volcánica calcinada | 13.51 | 14.46 | 3.12 | 61.07 | Cl ⁻¹ , SO ₄ ⁻² | NO ₃ ⁻¹ |
| Piedra volcánica sin calcinar | 19.72 | 39.33 | 3.72 | 80.36 | SO ₄ ⁻² , Cl ⁻¹ | NO ₃ ⁻¹ |
| Arena de rio y carbon activado | 26.26 | 1.23 | 3.82 | 38.13 | NO ₃ ⁻¹ , SO ₄ ⁻² | Cl ⁻¹ |

GRAFICA 9.28 RELACION DE IONES EN EL EFLUENTE



9.11 ELECCION DEL MATERIAL ADSORBENTE PARA LA REDUCCION DE pH Y DUREZA TOTAL.

Los resultados del análisis que hasta aquí se ha desarrollado de los datos de la pruebas de adsorción con los diferentes materiales se presenta en la tabla 9.3. En esta tabla se muestra que material o materiales reducen o remueve una especie de forma efectiva para cada volumen de agua lluvia tratada.

La información proporcionada por las prueba indica que las columnas de perlita malla 30 y de piedra volcánica sin calcinar presentan los mejores rendimientos para la reducción de pH.

Estas columnas son muy estables con el aumento del volumen que pasa por cada uno de los lechos, siendo la diferencia de reducción de ambos mínima por lo que los dos materiales pueden ser seleccionados.

Sin embargo la columna de piedra volcánica sin calcinar es menos efectiva en la remoción de los otros contaminantes si se compara con la columna de perlita malla 30.

Con respecto a la dureza, la columna de arena y carbón tiene las mejores propiedades para la remoción de la dureza del agua lluvia de los tanques de almacenamiento en la zona de estudio, además de su estabilidad durante las pruebas.

La columna de arena y carbón mostró ser efectiva en la remoción de la mayoría de contaminantes analizados en el agua lluvia tratada.

TABLA 9.3: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN LA REMOCIÓN DE LOS CONTAMINANTES ANALIZADOS EN EL AGUA LLUVIA

| Contaminante / Parámetro | Mejor trabajo a 500 mL | Mejor trabajo a 1000 mL | Mejor trabajo a 1500 mL |
|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| pH | E, B | E, C, B | |
| Conductividad | B | B | B, F |
| Nitratos | F | F | F |
| Sulfatos | F, B | D, B, F, E | |
| Cloruros | D, B | B | |
| Dureza Total | E, F | E, F | |

Los planteamientos anteriores nos llevan a la conclusión de elegir a los lechos : Perlita malla US 30 y Carbo activado con Arena de río malla US 20; como los medios adsorbentes que bajo las condiciones en las que se desarrollaron las pruebas, son efectivos en el tratamiento de agua lluvia del Cantón San Jerónimo Los Planes, Nejapa.

CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos de la caracterización físico-química realizados a muestras de agua lluvia de los colectores instalados en la zona de estudio durante la estación lluviosa del año 2003, indican que los niveles de contaminación de los parámetros establecidos (Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica; CO_2 , NO_3^{-1} , SO_4^{-2} , Cl^{-1} , Dureza) para este estudio; no exceden los límites establecidos en la Norma Salvadoreña Obligatoria para la calidad del agua.(NSO), lo cual indica que el agua lluvia cumple con los requisitos de la NSO en cuanto a estos parámetros en el momento en que es colectada.
2. Las muestras de agua lluvia colectada en los tanques de captación y almacenamiento fueron las únicas que mostraron valores altos de pH y fuera de la Norma Salvadoreña Obligatoria Para La calidad del Agua Potable (NSO) que es de 6.0 a 8.5 unidades de pH. En el tanque comunal, el 82 % de las muestras arrojaron valores fuera de la norma, mientras que en el tanque familiar fue de 66% de muestras fuera de norma. En los otros colectores, el pH se mantuvo dentro de la norma, con algunas excepciones. Esto nos lleva a la conclusión de que el agua que se consume directamente de tanques de almacenamiento posee una calidad no apta y requiere un tratamiento de ajuste de pH.
3. Los valores de dureza de los tanques superan el valor máximo admisible (400 mg/L, NSO #01ES/2000). Con este aumento en la dureza se puede suponer que hay una concentración de elementos que aumentan la dureza ya que como se mencionó anteriormente, en los colectores plásticos el agua lluvia posee una dureza promedio de 56.01, 50.15 y 101.8 mg/L en los puntos No 1, 2 y 4 respectivamente.

Hay una disminución de la dureza de los tanques de almacenamiento a medida que avanza el invierno, sin embargo, esto solo representa el

comportamiento en esta época. Puede suponerse que en la época seca, la dureza puede aumentar por efecto de dilución. Lo anterior nos lleva a la conclusión de la necesidad de aplicar un tratamiento adecuado que reduzca la dureza del agua almacenada. Los demás contaminantes (Temperatura, Conductividad Eléctrica; CO_2 , NO_3^{-1} , SO_4^{-2} , Cl^{-1}), no exceden los valores recomendados.

4. Bajo las condiciones experimentales a las que fue sometida la perlita expandida, se encontró que tiene la mejor capacidad de reducir el pH del agua lluvia con las características físico-químicas ya descritas. También presentó buenas propiedades para la remoción de los otros contaminantes analizados, dando una respuesta estable con el aumento del volumen de agua tratada.
5. La dureza del agua lluvia aquí descrita puede ser removida y llevada a valores aceptables por la NSO #01ES/2000 utilizando una combinación de arena de río y carbón activado sometidos a un tratamiento físico y químico descrito en esta investigación.

RECOMENDACIONES

1. La investigación de los niveles de contaminación se centró en el análisis de parámetros físico-químicos excluyéndose el análisis microbiológico del agua lluvia, por lo cual, se recomienda que en próximos estudios relacionados con el tratamiento de agua lluvia se realicen análisis bacteriológicos de esta fuente de agua.
2. El agua lluvia es un recurso que por su naturaleza puede mostrar una alta variabilidad en su calidad físico-química a través del tiempo. Las conclusiones a las que llegó esta investigación se basó en los datos obtenidos para el periodo invernal del año 2003. Para tener una base más confiable sobre la calidad del agua lluvia para fines de consumo humano, se recomienda llevar a cabo un monitoreo por un periodo de tiempo más amplio (3 a 5 años).
3. En esta investigación se identificaron tres materiales con capacidad de ajustar el pH y de reducir la dureza del agua lluvia. De estos materiales, la perlita expandida malla 30 US presentó la mejor capacidad de ajuste del pH. La combinación de carbón activado y arena presentó excelentes propiedades en la reducción de la dureza total, además de otros contaminantes. En base a estos resultados recomendamos en próximos estudios llevar a cabo en columnas de adsorción, la combinación de estos materiales como lechos adsorbentes a fin de evaluar sus propiedades combinadas.
4. A fin de proponer una solución al problema de contaminación de agua lluvia por elevados niveles de pH y dureza se recomienda, sobre la base de los resultados cualitativos de esta investigación, llevar esta investigación al nivel de diseño experimental de las variables

involucradas en el fenómeno de la adsorción de agua lluvia en lechos adsorbentes.

5. El agua lluvia que se encuentra almacenada no es recomendable para beber ya que posee valores de pH y Dureza que son superiores a los que recomienda la Norma Salvadoreña Obligatoria para la calidad del agua, además, no se conoce la calidad microbiológica de esta fuente.
6. Debido a que la contaminación del agua lluvia proviene al menos, del sistema de captación y almacenamiento, se recomienda mejorar las condiciones a las cuales se realizan estas operaciones, lo cual puede consistir en aplicar un tratamiento adecuado a los tanques de almacenamiento y en la limpieza y mantenimiento de los elementos físicos que entran en contacto con el agua lluvia.
7. Las conclusiones sobre la calidad del agua lluvia son válidas solo para la zona estudiada, de modo que investigaciones posteriores relacionadas con esta fuente de agua deben tomar en cuenta otros factores que pueden afectar la calidad fisicoquímica del agua lluvia.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Amaya Dubon, Coralia Diaz, **Aplicaciones Industriales del Mineral de Perlita de El Salvador**. Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero químico; Universidad de El Salvador; San Salvador, 1980.
2. Ascencio Corea, Borja Soriano, Nolasco Duarte, Zelaya Castillo. **“Instalación y Evaluación del Funcionamiento de un filtro de Arena de Goteo Lento Para Potabilización de agua en la Comunidad rural La Pinera, Municipio de Apopa, San Salvador”** Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero químico; Universidad de El Salvador; San Salvador, 1995.
3. Bonilla, Marlon Bonifacio; **“Propuesta para el Diseño de un Sistema de Tratamiento Físico-Químico para aguas residuales del Hospital Nacional de Neumología y Medicina General Dr. José Saldaña”**; Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero químico; Universidad de El Salvador; San Salvador, 2001.
4. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología , Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE); **“Norma Salvadoreña Obligatoria para la calidad del Agua Potable”**; San Salvador; El Salvador, 1999.
5. Cazares Martel, Rivera Granados, Escobar Vasquez. **“Evaluación del uso de la Lava Volcánica en la Industria”**. Seminario de Graduación de Ingeniería Química. Universidad de El Salvador; San Salvador. 1976.

6. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (R.A.M.A). **“Precipitaciones ácidas en la zona metropolitana de la ciudad de México”** , informe anual 1996.
7. Flores Meléndez, Martínez Barrera, Martínez Ortiz. **“Eliminación de Hierro y Manganeso en Agua Natural por medio de Aireación y Retención con Lava Volcánica”**. Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero químico; Universidad de El Salvador; San Salvador, 1992.
8. Hernández Guzmán, Mendoza Nolasco. **“Diseño y Construcción de un Filtro de Agua para uso domiciliario en áreas rurales”** Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero químico; Universidad de El Salvador; San Salvador, 1988.
9. Instituto Geográfico Nacional; **“Monografías del Departamento de Salvador y sus municipios”**; San Salvador, 1990.
10. Manuel Antonio Gallo. **“Propuesta para la enseñanza de Estadística Aplicada a la Investigación en las Carreras de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de La Universidad de El Salvador”**. Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero químico; Universidad de El Salvador; San Salvador, 2001.
11. MARN/USAID; Proyecto **“ Transporte Urbano y Mitigación de la Contaminación Industrial y Municipal en el Área Metropolitana de San Salvador y alrededores”**; San Salvador, 1991.
12. Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. Dirección General de Salud. Unidad Epidemiológica. **“Consolidado de Diagnóstico**

Comunitario. Cantón San Jerónimo Los Planes. Municipio de Nejapa .Julio de 2003.

13. Organización Panamericana de la Salud(O.P.S); **“Guía para la calidad del agua potable”**; 1985.
14. Organización Panamericana de la Salud (O.P.S);Oficina sanitaria Panamericana, Oficina regional de la Organización Mundial de la Salud. **”Guías Para La Selección y Aplicación de Tecnologías de Desinfección del Agua Para Consumo humano en Pueblos Pequeños y Comunidades Rurales en América Latina y El Caribe”** . Septiembre de 1995. Washington,D.C.
15. Pérez Echegoyen, David; Reinado Martínez, Joaquín Arnoldo; **“Estudio Preliminar sobre Lluvia Ácida en el Área Metropolitana de San Salvador y alrededores”**; Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero químico; Universidad de El Salvador; San Salvador, 1991.
16. Programa Salvadoreño de Investigación Sobre Desarrollo y Medio Ambiente (PRISMA); **“Transporte Urbano y Contaminación del Aire en la Región Metropolitana de San Salvador RMSS”**; San Salvador, 1996.
17. Ricardo Antonio Lopez, Carlos Torres. **“Estudio Sobre La Capacidad de Intercambio Ionico de la Lava Volcánica en Tratamiento de Agua”**. Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero químico; Universidad de El Salvador; San Salvador,1986.
18. SWISS-CONTAC; **“Calidad del Aire en Centroamérica”**; San Salvador, 2001.

19. Tania Torres Rivera. **“Aplicación de la Estadística al Análisis Químico”**. Trabajo de graduación para optar al título de maestría en estadística; Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad de El Salvador; San Salvador, 2003.

20. Velásquez Quintanilla Merced; **“Guía Para La Elaboración de un Proyecto de Investigación”** parte II, Revista Mexicana de neurociencia, 2001.

21. Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano; **“Primer Informe Parcial del Sistema Urbano y Poblamiento (Diagnóstico)”** Plan nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial .Capítulo 6: Demografía e Información Básica Municipal. Junio de 2002.

22. Wark, Kenneth; **“Contaminación del aire, origen y control”**. México, 2001.

ANEXOS

ANEXO 1

PROCEDIMIENTOS ANALITICOS

A1.1 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

FUNDAMENTO

“ La medición de la temperatura de caída del agua lluvia es obtenida al poner en contacto un termómetro con una porción de muestra de agua lluvia, el cual proporciona la lectura”, de temperatura de caída del agua lluvia la cual será el promedio aritmético de los valores obtenidos al inicio y al final de la lluvia.

EQUIPO Y MATERIAL DE LABORATORIO.

Termómetro de mercurio.

Beaker de 50 mL.

PROCEDIMIENTO

1. Tomar una muestra de agua lluvia de 20 mL y colocarla en un beaker de 50 mL.
2. Coloque el termómetro sumergiéndolo en la muestra de agua.
3. Espere un periodo de tiempo (3 minutos) o el suficiente que permita obtener una lectura constante en el termómetro.
4. Una vez constante la lectura en el termómetro, repórtela como la temperatura de la muestra.
5. Repita el procedimiento (hacer dos lecturas), siguiendo el proceso descrito al inicio de la lluvia y cuando finaliza.

A1.2 DETERMINACIÓN DE pH

FUNDAMENTO

“ Para la mayoría de los propósitos prácticos el pH de una solución acuosa se puede tomar como el logaritmo base 10 del inverso de la concentración del ion hidrógeno”.

La escala práctica de pH se extiende desde cero (muy ácida) a 14 (muy alcalina), con el valor medio de 7 correspondiente a la neutralidad exacta a 25°C en el cual los iones hidrógeno e hidróxido existen a la misma concentración.

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] = \log 1 / [\text{H}^+]$$



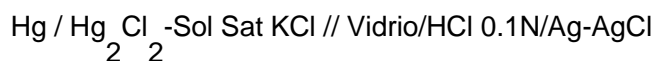
RELACIÓN DE pH, pOH y Concentración de H⁺ y OH⁻

FIG. A1.1 RELACIÓN DE pH, pOH Y CONCENTRACIÓN DE H⁺ y OH⁺

El pH de las aguas naturales, como el agua lluvia, está gobernado por el equilibrio dióxido de carbono, bicarbonatos y otros, presentando valores comprendidos entre 4.0 y 8.5.

El pH se determina por la medición de la fuerza electromotriz, de una celda que comprende un electrodo indicador (electrodo de vidrio) sumergido en una solución de prueba, y el electrodo de referencia (generalmente el de calomel).

Este método determina el pH, midiendo el potencial generado (en milivoltios) por un electrodo de vidrio que es sensible a la actividad del ión H^+ , este potencial es comparado contra un electrodo de referencia, que genera un potencial constante e independiente del pH. El electrodo de referencia que se utiliza es el de calomel saturado con cloruro de potasio, el cual sirve como puente salino que permite el paso de los milivoltios generados hacia el circuito de medición. La cadena electroquímica de este sistema de medición es:



en el siguiente esquema se muestran los electrodos utilizados.

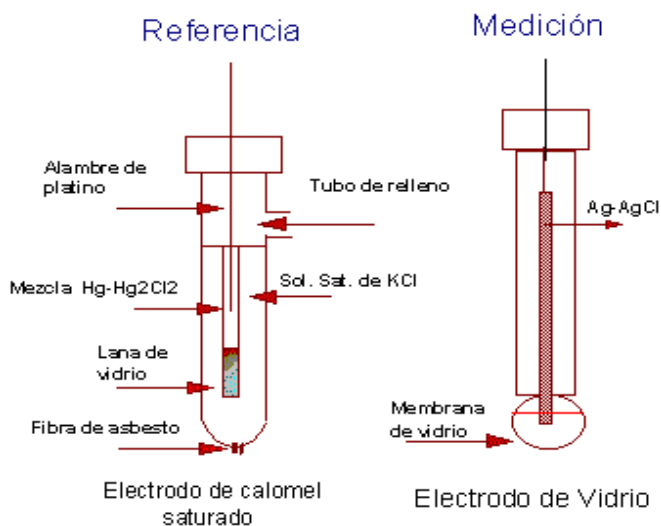


FIG. A1.2 ESQUEMA DE LOS ELECTRODOS UTILIZADOS.

En esta investigación se utilizó un medidor de pH eléctrico de lectura digital, siempre que fue posible, se hizo la medición en el momento de la toma de la muestra, caso contrario, se midió en las próximas veinticuatro horas después de la toma de muestra.

INTERFERENCIAS

El electrodo de vidrio es relativamente inmune a las interferencias de calor, turbiedad, cloro libre, agentes oxidantes o reductores, así como salinidad alta.

EQUIPO DE VIDRIO Y MATERIAL DE LABORATORIO.

Equipo : medidor de pH portátil

Procedimiento

El procedimiento para medir el pH en el campo lo dará el proveedor del medidor de pH portátil que se adquiera para tal fin. El procedimiento común en los medidores de pH se describe a continuación.

1. Conectar a la corriente eléctrica el medidor de pH y dejar que caliente por cinco minutos, antes de usarlo.
2. Poner la solución buffer pH-7 en un beaker de 50 mL, de tal forma que el nivel esté a cinco cm aproximadamente del fondo hacia arriba.
3. Leer la temperatura de la solución buffer. Si el equipo tiene control de temperatura, fije con el a la temperatura del buffer.
4. Lavar los electrodos con agua destilada e introdúzcalos en el buffer, luego estandarice el equipo al valor del pH del buffer de 7.
5. Una vez estandarizado el equipo; lave los electrodos con agua destilada, posteriormente secarlos con papel suave.
6. Tome una porción de agua lluvia de 50 mL y colóquela en un beaker de 50 mL; tome la temperatura. Si se utilizará compensador de temperatura fije control a la temperatura de la muestra de agua lluvia. Los electrodos deben quedar adecuadamente cubiertos con la muestra.

7. Coloque los electrodos en la muestra de agua lluvia, cuidando de efectuar la lectura de pH cuando el equipo proporcione una lectura estable, es decir que el valor leído no cambie.
8. Efectuar la medición por triplicado y sin agitar la muestra para evitar la perdida de CO₂ y otros componentes volátiles, los cuales alteran el valor del pH.

A1.3 DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (SÓLIDOS DISUELTOS)

FUNDAMENTO

”La **conductividad eléctrica**, se define como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución (electrolitos) para conducir la corriente eléctrica. El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo el agua con sales disueltas conduce la corriente eléctrica”.

Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad.

En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad, este efecto continúa hasta que la solución está tan llena de iones que se restringe la libertad de movimiento y la conductividad puede disminuir en lugar de aumentar, dándose casos de dos diferentes concentraciones con la misma conductividad.(ver tabla A1.1)

TABLA A1.1 VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DE ALGUNAS MUESTRAS TÍPICAS

| TEMPERATURA DE LA MUESTRA :25 ° C | CONDUCTIVIDAD, $\mu\text{S/cm}$ |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Agua ultra pura | 0.05 |
| Agua de alimentación a calderas | 1 a 5 |
| Agua potable | 50 a 100 |
| Agua de mar | 53,000 |
| 5 % NaOH | 223,000 |
| 50 % NaOH | 150,000 |
| 10 % HCl | 700,000 |
| 32 % de HCl | 700,000 |
| 31 % HNO ₃ | 865,000 |

Todos los valores de conductividad están referidos a una temperatura de referencia de 25°C

PRINCIPIOS

La conductividad eléctrica es el recíproco de la resistencia en ohms, medida entre las caras opuestas de un cubo de 1.0 cm de una solución acuosa a una temperatura especificada.

Esta solución se comporta como un conductor eléctrico donde se pueden aplicar las leyes físicas de la resistencia eléctrica.

Las unidades de la conductividad eléctrica son el Siemens/cm (anteriormente mhos/cm que son numéricamente equivalentes al S/cm).

En la práctica no se mide la conductividad entre electrodos de 1 cm³ sino con electrodos de diferente tamaño, rectangulares o cilíndricos, por lo que al hacer la medición, en lugar de la conductividad, se mide la conductancia, la cual al ser multiplicada por una constante (k) de cada celda en particular, se transforma en la conductividad en S/cm.

$$\text{Conductividad} = \text{Conductancia de la muestra} * k$$

$$k = d/A$$

k: Constante de la celda

d: distancia de la separación de los electrodos

A: Area de los electrodos

Así, un electrodo de 1 cm de separación y con área de 1 cm², tendrá una $k = 1$

La medición eléctrica se efectúa mediante un puente de Wheastone para medir resistencias.

En la figura a1.3 las resistencias R1 y R2 son fijas y su valor va de acuerdo al intervalo de conductividad que se pretende medir. La resistencia Rx es la que proporciona la solución a la cual se le va a medir la conductividad. La resistencia R3 se varía en forma continua hasta poner en equilibrio el puente, de tal forma que no pase corriente hacia el medidor.

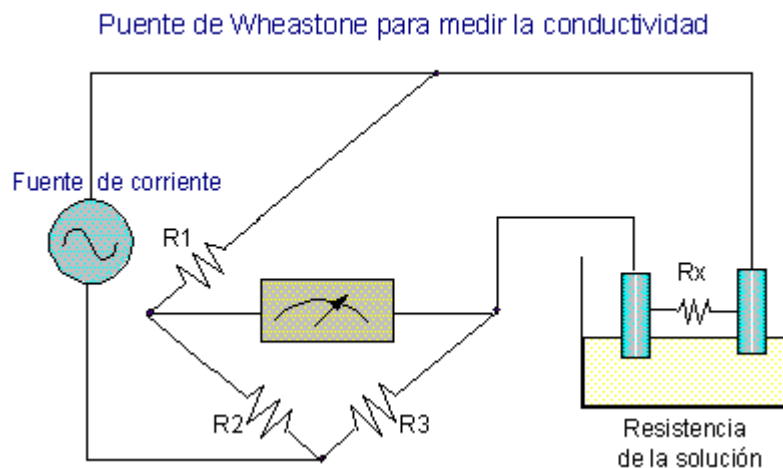


FIG. A1.3 PUENTE DE WHEASTONE PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD

Algunas sustancias se ionizan en forma más completa que otras y por lo mismo conducen mejor la corriente. Cada ácido, base o sal tienen su curva característica de concentración contra conductividad.

Son buenos conductores : los ácidos, bases y sales inorgánicas: HCl, NaOH, NaCl, Na₂CO₃, etc.

Son malos conductores : Las moléculas de sustancias orgánicas que por la naturaleza de sus enlaces son no iónicas: como la sacarosa, el benceno, los hidrocarburos, los carbohidratos, etc, estas sustancias, no se ionizan en el agua y por lo tanto no conducen la corriente eléctrica.

Un aumento en la temperatura, disminuye la viscosidad del agua y permite que los iones se muevan más rápidamente, conduciendo más electricidad. Este efecto de la temperatura es diferente para cada ion, pero típicamente para soluciones acuosas diluidas, la conductividad varía de 1 a 4 % por cada ° C.

Conociendo estos factores, la medición de la conductividad nos permite tener una idea muy aproximada del contenido de iones en una muestra.

INTERFERENCIAS

- La exposición de la muestra al aire atmosférico, puede causar cambios en la conductividad, debido a pérdida o ganancia de gases disueltos, en especial el CO₂. Esto es especialmente importante para aguas de alta pureza, con concentraciones bajas de gases y sustancias ionizables. **Para evitar esto se debe tener una atmósfera inerte de nitrógeno o helio sobre la muestra.**
- Sustancias no disueltas o materiales que precipiten lentamente en la muestra, pueden causar ensuciamiento en la superficie de los electrodos y causar lecturas erróneas.
- El ensuciamiento por sustancias orgánicas, bio ensuciamientos y corrosión de los electrodos, causan lecturas inestables o erróneas.

- El factor de correlación para obtener los valores cuantitativos de los sólidos totales disueltos solo es válido cuando la muestra tiene un pH entre 5 y 8, a valores mayores o menores de pH, los resultados no serán confiables. Se tendrá que ajustar el valor del pH a cerca de 7.0 utilizando un ácido o una base débil según sea necesario.

MATERIAL

Medidor de conductividad.

Termómetro de 0 a 110 ° C

Vaso de precipitado de forma larga, de 100ml

REACTIVOS

- Alcohol etílico del 95 % (Para el lavado de los electrodos)
- Agua destilada ultra pura
- Solución estándar (1) de cloruro de potasio KCl .Esta solución tiene una conductividad de 1,413 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

ESTANDARIZACIÓN

Para verificar el estado general del conductímetro, se deben hacer mediciones de la conductividad de las soluciones estándar 1 y en su caso calibrar la lectura del instrumento a que den los valores especificados.

PROCEDIMIENTO

Ya que hay un gran número de marcas y modelos de conductímetros en el mercado, para un detallado procedimiento habrá que referirse al manual de manejo del instrumento que se este usando.

OBSERVACIONES

La celda deberá estar limpia antes de hacer cualquier medición.

La celda debe de estar suspendida en la solución de tal manera, que los orificios de venteo estén sumergidos. La cámara del electrodo no debe tener aire entrampado (esto se logra inclinando ligeramente la celda y golpeando suavemente los lados). La celda deberá estar separada de las paredes y el fondo del recipiente, por lo menos 0.5 cm.

Si es posible, el recipiente o el sistema en donde se va a hacer la medición deberá estar aislado del potencial de la tierra. La presencia de campos eléctricos y corrientes espurias causadas por agitadores magnéticos, calentadores, etc., pueden causar dificultad para obtener lecturas adecuadas. El usuario deberá evaluar estos efectos y hacer las correcciones necesarias, utilizando cableado blindado o desconectándolos por un momento al hacer la lectura.

Manejar la celda con cuidado, para evitar que se rompa o que pierda su calibración. La celda no se deberá transferir de una solución a otra, no sin antes lavarla cuidadosamente.

No guarde la celda sucia o contaminada.

CÁLCULOS

Si el instrumento da lecturas en conductancia:

$$\text{Conductividad} = \text{Conductancia} * k$$

$$k = \text{Constante de la celda}$$

Si el instrumento da lecturas en conductancia, anotar el valor tal como se observa en la escala.

BIBLIOGRAFÍA:

American Society for testing and Materials. Annual Book of Standards 1994
Determinación de Conductividad eléctrica del agua. Método ASTM D 1125-91
Standard methods for the examination of water and waste water publicado por la
APHA.

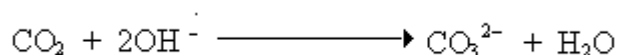
Medición de conductancia, Método 2510 B - 1995

A1.4 DETERMINACION DEL DIÓXIDO DE CARBONO LIBRE

FUNDAMENTO

“La determinación de CO₂ libre en el agua lluvia es llevada a cabo por la valoración de una solución de hidróxido de sodio. Aunque estén presentes otros ácidos en la muestra el resultado de los análisis es reportado como la acidez total expresada como CO₂”.

REACCION QUÍMICA :



EQUIPO DE VIDRIO Y MATERIAL DE LABORATORIO

Beaker de 100 mL

Bureta de 25 mL

Erlenmeyer de 125 mL

Pipeta de 25 mL

Soporte

Agitador de vidrio

Embudo para filtración

Papel filtro Whatman #1

REACTIVOS

- Solución de hidróxido de sodio 0.0025 N
- Fenoftaleína 1% p/v
- Biftalato de potasio calidad reactivo (patrón primario)
- Agua destilada libre de CO₂

PREPARACIÓN DE LA SOLUCION DE HIDROXIDO DE SODIO 0.1 N

1. Ebulir 2 Litros de agua destilada y enfriar.
2. Preparar un embudo de filtración , previamente lavado y con material filtrante (asbesto).
3. Pesar 10 g. de hidróxido de sodio en perlas.
4. En un erlenmeyer de 125 mL, agregar 10 mL de agua destilada y agitar hasta lograr una disolución total del hidróxido de sodio
5. Enfriar a temperatura ambiente.
6. Filtrar y recibir en un beaker el filtrado
7. Medir con una pipeta 4.0 mL del filtrado y trasladarlo a un volumétrico de 1.0 Litro, luego aforar con el agua destilada preparada al inicio. Se tendrá una solución 0.1 N de hidróxido de sodio, de concentración aproximada.

ESTANDARIZACION DE LA SOLUCION DE HIDROXIDO DE SODIO 0.1 N APROXIMADA CON BIFTALATO DE POTASIO.

1. Pesar 0.5 g de biftalato de potasio $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ secado por dos horas a 110°C o 230°F.
2. En un erlenmeyer de 125 mL, disolver con 50 mL de agua destilada el biftalato de potasio.
3. Agregar 2 gotas de fenolftaleína y titular con la solución de hidróxido de sodio preparada anteriormente, hasta que aparezca el primer vire rozado.

PREPARACIÓN DE UNA SOLUCIÓN DE HIDROXIDO DE SODIO 0.0025 N

Una vez conocida la normalidad exacta de la solución de NaOH 0.1 N, se procede a obtener por dilución la solución de hidróxido de sodio 0.0025 N

1. Tomar 12.5 mL de solución de hidróxido de sodio 0.1 N si es exacta o el volumen equivalente de acuerdo a la normalidad real.
2. Aforar el volumétrico a 500 mL con agua destilada libre de CO₂.
3. Se procede a estandarizar la solución con biftalato de potasio de 0.01 gr diluido en 25 mL de agua destilada. Luego seguir los pasos del proceso anterior a partir del paso No 3 (ver estandarización).

PROCEDIMIENTO.

1. Tomar 20 mL de muestra de agua lluvia.
2. Agregue 2 gotas de fenolftaleína 1% p/v
3. Titule con solución de hidróxido de sodio 0.0025 N hasta que de el primer vire o cambio de color (de incoloro a rojo tenue).
4. Anote el volumen gastado de NaOH 0.0025 N (V NaOH).

A1.5 DETERMINACIÓN DE NITRATOS

FUNDAMENTO

El análisis potenciométrico con electrodos selectivos de iones es una técnica electroquímica de equilibrio en la que se mide un potencial de membrana relacionado con la actividad del ion analito (i) según la siguiente ecuación:

$$E = L + \beta (0.0596 / z_i) \log [a_i + \sum_j (k_{i,j} \text{ pot } a_j z_i / z_j)]$$

donde a_i es la actividad del ión que se pretende determinar y a_j es la actividad de una especie interferente cualquiera (j). La carga de cada especie está dada por su

número de carga z_i , que es positivo para los cationes y negativo para los aniones. El coeficiente $k_{i,j}$ se denomina coeficiente de selectividad potenciométrico para la pareja de iones (i,j) . El valor de β (eficiencia electromotriz de la membrana) suele ser cercano a la unidad y se determina por calibración, al igual que la constante L .

La determinación potenciométrica de nitratos se lleva a cabo con un electrodo de membrana de cambiador iónico líquido. Un cambiador líquido de aniones es una disolución que contiene un catión orgánico hidrofóbico y de gran tamaño, totalmente insoluble en agua (por ejemplo, un catión amonio cuaternario provisto de cadenas hidrocarbonadas C-12 a C-16) y un anión de pequeño tamaño y carácter hidrofílico (por ejemplo, nitrato), formando un par iónico insoluble en agua pero soluble en un disolvente orgánico polar inmiscible con agua (por ejemplo, decanol).

La disolución orgánica resultante puede intercambiar el anión hidrofílico con una disolución acuosa, pero no el catión hidrofóbico, que es incapaz de atravesar la interfase disolvente orgánico-agua. El par iónico formado por el anión analito debe ser más estable que los que pueda formar el catión orgánico del cambiador con otros aniones interferentes que puedan existir en la muestra.

Los electrodos selectivos responden linealmente a cambios en el logaritmo de la actividad del ion. Las determinaciones de concentración se llevan a cabo por comparación de las actividades del ion analito en la disolución muestra con disoluciones patrón de concentración conocida. Esta comparación sólo es válida si los coeficientes de actividad iónicos en los patrones de calibración y en las muestras son iguales. Para conseguir esta igualdad se ajusta la que se diluyen y enrasan patrones y muestras. Para la determinación de nitrato se utiliza Sulfato de Amonio 2 M como solución de ajuste.

Las membranas de cambiador iónico líquido se deterioran por adsorción irreversible de determinados compuestos orgánicos y materiales coloidales, que deben ser eliminados de las muestras por tratamiento con adsorbentes como carbón activo y filtración posterior.

Los aniones interferentes como el ion cloruro, cuando están presentes en la muestra a altas concentraciones, deben eliminarse mediante separaciones previas. El cloruro se puede precipitar con sulfato de plata, calentando en baño de agua para coagular el precipitado coloidal de cloruro de plata, filtrando y lavando el filtro con sulfato potásico 0.1 M. La determinación de nitrato se llevará a cabo por el método de adiciones estándar en este filtrado.

INSTRUMENTACIÓN

- Potenciómetro
- Electrodo selectivo de ion nitrato. (NO_3^-)
- Electrodo de referencia de KCl 3M
- Agitador magnético con barra magnética
- Micro pipetas con capacidad de 500, 200 y 1000 micro litros

REACTIVOS

- Agua destilada o desionizada.
- Solución patrón de Nitratos, (1000 ppm del ion nitrato NO_3^-): añadir 1.37 gr de Nitrato de Sodio NaNO_3 grado reactivo en 100 ml de agua destilada y aforar a un litro.
- Solución de ajuste de la fuerza iónica: Sulfato de Amonio 2 M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, (ISA : Ionic Strength Adjuster). Para preparar esta solución se adicionan 264 gr de Sulfato de Amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, grado reactivo en 100 mL de agua destilada y aforar a 1000 mL . Procurar dar a la solución un tiempo extenso

de mezcla. De la solución ISA se añaden 2 mL por cada 100 mL de estándar obteniendo una solución de ajuste iónico de 0.12 M aproximadamente.

PROCEDIMIENTO

CALIBRACIÓN

1. Un volumen exactamente conocido (20 mL) de solución de ajuste de la fuerza iónica se coloca en la celda, (0.4 mL de ISA para 20 mL de muestra) se sumergen los electrodos, se conecta el agitador magnético y se espera que el electrodo alcance una lectura de potencial estable.
2. A continuación se añaden sucesivamente pequeños volúmenes de disolución patrón de nitrato,(50 microlitros y 200 microlitros) tomando la lectura de potencial tras cada adición una vez se haya estabilizado, lo que requiere aproximadamente un minuto. Es necesario calcular previamente los volúmenes que deben adicionarse para abarcar al menos el intervalo de concentración comprendido entre 0.25 y 1000 ppm. Este intervalo puede ser modificado cuando la concentración de la muestra sea pequeña. A continuación se presentan los volúmenes requeridos para comprender dicho rango de concentraciones de solución patrón.
3. Las lecturas de potencial se deben representar frente al logaritmo de la concentración de nitrato presente en la celda tras cada adición. La pendiente de la gráfica de calibración se obtiene a partir del ajuste de mínimos cuadrados de los datos.

La calibración del equipo debe hacerse el día que se lleve a cabo la determinación de nitratos. Cuando la curva de calibración muestre

tendencia similares, podrá espaciarse su preparación en un intervalo de tiempo mayor, aunque es recomendable seguir un ritmo constante de preparación.

TRATAMIENTO DE LA MUESTRA

Si la muestra contiene cloruros en cantidades apreciables, se eliminan por precipitación con sales de plata. Para ello se colocan en un tubo de ensayo 1.00 mL de muestra y se les añaden 4 mL de sulfato de plata 0,02 M, calentando en baño de agua a unos 80 grados para facilitar la coagulación del precipitado. Tras enfriar, se añade carbón activo para eliminar los compuestos orgánicos capaces de adsorberse, que deterioran la membrana de PVC. Se filtra y se recoge el filtrado en un matraz de 50 mL , lavando el filtro y enrasando con la disolución de ajuste de la fuerza iónica. De esta disolución se toma una alícuota de 5 mL y se diluye a 50 mL en un matraz aforado para llevar a cabo la determinación.

DETERMINACIÓN DE NITRATOS

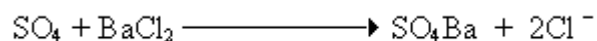
1. Preparar el equipo requerido para la determinación del ion nitrato por el método del ion selectivo de nitratos.
2. El electrodo de medición se deja por 30 minutos o más en una solución de Sulfato de Amonio (ISA).
3. Lavar el electrodo con abundante agua destilada y secar con papel suave.
4. preparar 20 mL de muestra en beakers de 100 mL.
5. Añadir 2 mL de Solución de ajuste de la fuerza iónica: Sulfato de Amonio 2 M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, (ISA : Ionic Strength Adjuster), a la muestra.
6. Medir el potencial de la muestra cuando se encuentre estabilizado.

A1.6 DETERMINACIÓN DE SULFATOS

FUNDAMENTO

“La concentración de sulfatos en agua lluvia puede determinarse por la formación y medición de la turbidez, generada por los sulfatos del agua lluvia al reaccionar con el cloruro de bario, siendo el sulfato de bario el responsable de la turbidez formada en la muestra, la cual será medida espectrofotométricamente a 410 nm”.

REACCION QUÍMICA :



EQUIPO Y MATERIALES DE LABORATORIO

- 1 Espectrofotómetro.
- 2 Cubetas para espectrofotómetro
- 1 Espátula
- 2 Goteros
- 1 Volumétrico de 1000 mL
- 4 Volumétricos de 100 mL
- 1 Pipeta de 5 mL
- 1 Beaker de 500 mL
- 12 tubos de ensayo.

REACTIVOS

- Ácido clorhídrico 1+1
- Cloruro de bario en cristales (calidad reactivo)

- ❑ Sulfato de sodio anhidrido (calidad reactivo)
- ❑ Glicerina concentrada
- ❑ Agua destilada libre de sulfato o agua desmineralizada
- ❑ Alcohol etílico (calidad reactivo)

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES PATRON DILUIDAS A PARTIR DE LA SOLUCION MADRE.

En el cuadro siguiente se detallan los ml de solución patrón de sulfato de sodio (100 mg / Litro), que se toman y son colocados en volumétricos de 100 mL posteriormente se afora a 100 mL.

PREPARACIÓN DE SOLUCIONES PATRON DILUIDOS A PARTIR DE LA SOLUCION PATRON MADRE

TABLA A1.2 PREPARACIÓN DE SOLUCIONES PATRÓN DILUIDOS A PARTIR DE LA SOLUCIÓN PATRÓN MADRE

| ml tomados de solución Madre | Cantidad de agua destilada a agregar en volumétricos de 100 ml | Concentración patrón diluida ,mg/L |
|------------------------------|--|------------------------------------|
| 2.5 | 97.5 | 2.5 |
| 5.0 | 95.0 | 5.0 |
| 7.5 | 92.5 | 7.5 |
| 10.0 | 90.0 | 10.0 |

PROCEDIMIENTO

1. Tomar 5 mL de muestra de agua lluvia y rotularlo como “muestra”, lavar con una solución de alcohol (1 + 1) las cubetas que serán utilizadas en el espectrofotómetro.

2. Tomar 5 mL de agua destilada y rotularlo como "blanco".
3. Tomar 5 mL de las soluciones patrón diluidas preparadas (2.5, 5.0, 7.5, 10 mg/L) y colocarlas en diferentes tubos, cuidando de rotularlas con sus respectivas concentraciones.
4. Agregar 3 gotas de ácido clorhídrico (1 + 1) con un gotero, a la muestra, al blanco y los patrones diluidos.
5. Luego añadir 0.005 g de cloruro de bario en cristales a la muestra, blanco y los estándares, agitar los tubos hasta disolver los cristales. Espere 10 min.
6. Una vez transcurrido este tiempo; agregue una gota de glicerina concentrada para cada cubeta (muestra, blanco y estándares) en el momento oportuno; primeramente para el blanco y agite vigorosamente, calibre el espectrofotómetro a 0.00A, el espectrofotómetro debe estar listo al realizar el análisis.

Encender el espectrofotómetro y espere que esté caliente por 5 minutos y poner 0 %T o infinito de absorbancia.

Seleccione la longitud de onda 410 nm.

7. Luego leer absorbancia; primeramente para las distintas soluciones de los patrones diluidos, agitando cada cubeta antes de efectuar la lectura; tomando como el valor correcto el mayor dato leído en el dial del espectrofotómetro, instantes después de colocarle la cubeta. Con estos datos graficar la curva de calibración.
8. Leer la absorbancia para las muestras de agua lluvia, agitando la cubeta conteniéndola, la lectura mayor obtenida es el valor buscado.
9. Con los datos de absorbancia y utilizando la curva de calibración, se puede conocer la concentración de sulfatos en la muestra de agua lluvia.

A1.7 DETERMINACIÓN DE CLORUROS

FUNDAMENTO.

“El análisis potenciométrico con electrodos selectivos de iones es una técnica electroquímica de equilibrio en la que se mide un potencial de membrana relacionado con la actividad del ion analito”.

La determinación potenciométrica de cloruros se lleva a cabo con un electrodo de membrana de cambiador iónico líquido. La mecánica entre iones es similar a la descrita en la determinación de nitratos por análisis potenciométrico de electrodos selectivos. Para la determinación de cloruros se utiliza Nitrato de Sodio 5 M como solución de ajuste.

INSTRUMENTACIÓN

- ❑ Potenciómetro
- ❑ Electrodo combinado (el cual consiste en un electrodo indicador selectivo de ion cloruro (Cl^-) y un electrodo de referencia que contiene una solución de 1 M / 0.1 M KNO_3 / KCl .)
- ❑ Agitador magnético con barra magnética
- ❑ Micro pipetas con capacidad de 500, 200 y 1000 micro litros

REACTIVOS

- ❑ Agua destilada o desionizada.

- Solución patrón de Cloruros, (1000 ppm del ion cloruro Cl^-): añadir 1.65 gr de Cloruro de Sodio NaCl grado reactivo en 100 mL de agua destilada y aforar a un litro.

- Solución de ajuste de la fuerza iónica: Nitrato de Sodio 5 M (NaNO_3), (ISA : Ionic Strength Adjuster). Para preparar esta solución se adicionan 425 gr de Nitrato de Sodio (NaNO_3), grado reactivo en 100 mL de agua destilada y aforar a 1000 mL . Procurar dar a la solución un tiempo extenso de mezcla.

De la solución ISA se añaden 2 mL por cada 100 mL de estándar obteniendo una solución de ajuste iónico de 0.12 M aproximadamente.

PROCEDIMIENTO

CALIBRACIÓN

1. Un volumen exactamente conocido (20 mL) de disolución de ajuste de la fuerza iónica se coloca en la celda, (0.4 mL de ISA para 20 mL de muestra) se sumergen los electrodos, se conecta el agitador magnético y se espera que el electrodo alcance una lectura de potencial estable.

2. A continuación se añaden sucesivamente pequeños volúmenes de disolución patrón de nitrato,(50 microlitros y 200 microlitros) tomando la lectura de potencial tras cada adición una vez se haya estabilizado, lo que requiere aproximadamente un minuto. Es necesario calcular previamente los volúmenes que deben adicionarse para abarcar al menos el intervalo de concentración comprendido entre 0.25 y 1000 ppm. Este intervalo puede ser modificado cuando la concentración de la muestra sea pequeña. A continuación se presentan los volúmenes requeridos para comprender dicho rango de concentraciones de solución patrón.

3. Las lecturas de potencial se deben representar frente al logaritmo de la concentración de nitrato presente en la celda tras cada adición. La pendiente de la gráfica de calibración se obtiene a partir del ajuste de mínimos cuadrados de los datos.

La calibración del equipo debe hacerse el día que se lleve a cabo la determinación de nitratos. Cuando la curva de calibración muestre tendencia similares, podrá espaciarse su preparación en un intervalo de tiempo mayor, aunque es recomendable seguir un ritmo constante de preparación.

TABLA A1.3 MICRO LITROS AÑADIDOS DE SOLUCIÓN PATRÓN

| Micro litros añadidos de solución patrón de cloruros | ppm del ion de Cloruros |
|--|-------------------------|
| 0 | 0 |
| 50 | 0.25 |
| 50 | 0.50 |
| 50 | 0.75 |
| 50 | 1.0 |
| 200 | 2.0 |
| 200 | 3.0 |
| 200 | 4.0 |
| 200 | 5.0 |
| 200 | 6.0 |
| 200 | 7.0 |
| 200 | 8.0 |
| 200 | 9.0 |
| 200 | 10.0 |
| Solución preparada de 100 ppm | 100.0 |
| Solución preparada de 1000 ppm | 1000.0 |

DETERMINACIÓN DE CLORUROS.

1. Preparar el equipo requerido para la determinación del ion cloruro por el método del ion selectivo de cloruros.
2. El electrodo de medición se deja por 30 minutos o más en una solución de Nitrato de Sodio 5 M (NaNO_3).
3. Lavar el electrodo con abundante agua destilada y secar con papel suave.
4. Preparar 20 mL de muestra en beakers de 100 mL.
5. Añadir 2 mL de Solución de ajuste de la fuerza iónica: Nitrato de Sodio 5 M (NaNO_3), (ISA : Ionic Strength Adjuster), a la muestra.
6. Medir el potencial de la muestra cuando se encuentre estabilizado.

A1.8 ANÁLISIS DE DUREZA TOTAL

La dureza es una característica química del agua que esta determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y ocasionalmente nitratos de calcio y magnesio . La dureza es indeseable en algunos procesos, tales como el lavado doméstico e industrial, provocando que se consuma más jabón, al producirse sales insolubles. Además le da un sabor indeseable al agua potable. La mayoría de los suministros de agua potable tienen un promedio de 250 mg/L de dureza. Niveles superiores a 500 mg/L son indeseables para uso doméstico.

ALMACENAJE DE LA MUESTRA

La muestra puede ser recolectada y almacenada en un recipiente de plástico, bien tapado.

CAMPO DE APLICACIÓN

El análisis de la dureza total en muestras de aguas es utilizado en la industria de bebidas, lavandería, fabricación de detergentes, acabados metálicos, teñido y textiles. Además en el agua potable, agua para calderas ,etc.

PRINCIPIOS

Niveles superiores a 500 mg/L son indeseables para uso doméstico. La dureza es caracterizada comúnmente por el contenido de calcio y magnesio y expresada como carbonato de calcio equivalente.

Existen dos tipos de dureza :

Dureza Temporal: Esta determinada por el contenido de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. Puede ser eliminada por ebullición del agua y posterior eliminación de precipitados formados por filtración, también se le conoce como "Dureza de Carbonatos".

Dureza Permanente: está determinada por todas las sales de calcio y magnesio excepto carbonatos y bicarbonatos. No puede ser eliminada por ebullición del agua y también se le conoce como " Dureza de No Carbonatos ".

INTERPRETACIÓN DE LA DUREZA

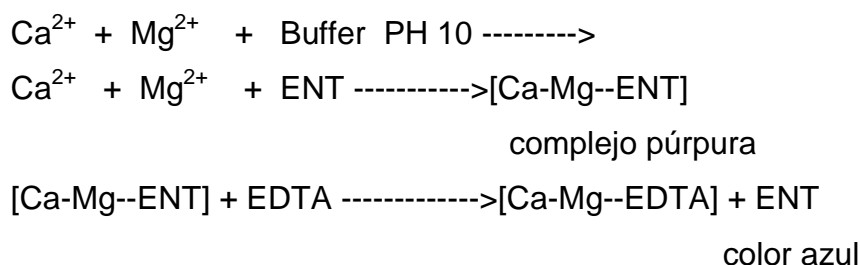
TABLA A1.4 INTERPRETACIÓN DE LA DUREZA

| Dureza como mg/L CaCO ₃ | Interpretación |
|------------------------------------|----------------|
| 0-75 | agua suave |
| 75-150 | agua poco dura |
| 150-300 | agua dura |
| Mayor de 300 | agua muy dura |

En agua potable, el límite máximo permisible es de 300 mg/L de dureza. Este método esta basado en la cuantificación de los iones calcio y magnesio por titulación con el EDTA y su posterior conversión a Dureza Total expresada como CaCO₃.

A la muestra de agua que contiene los iones calcio y magnesio se le añade el buffer de PH 10, posteriormente, se le agrega el indicador erio cromo negro T(NET), que hace que se forme un complejo de color púrpura, enseguida se procede a titular con EDTA (ácido etilendiamintetracético sal disódica) hasta la aparición de un color azul .

REACCIONES



INTERFERENCIAS

En la tabla se encuentran la lista de la mayor parte de las sustancias que interfieren.

Sí existen más de una sustancia interferentes, los límites dados en la tabla pueden variar. La turbidez se elimina por filtración .

TABLA A1.5 INTERFERENCIAS DEL MÉTODO TITRIMETRICO CON EDTA

| Interferencias | Concentración máx. sin interferir mg/L |
|----------------|--|
| Aluminio | 20 |
| Cadmio | * |
| Cobalto | 100 |
| Cobre | 50 |

TABLA A1.5. Continuación.

| Interferencias | Concentración máx. sin interferir mg/L |
|----------------|--|
| Hierro (+3) | 50 |
| Hierro (+2) | 50 |
| Plomo | * |
| Manganeso | 1 |
| Zinc | * |
| Polifosfatos | 10 |
| Níquel | 100 |

- Si están presentes son titulados como dureza.

APARATOS

El método empleado para la cuantificación de la Dureza Total es un método volumétrico por lo que no se requieren aparatos especiales.

MATERIAL

- 2 matraces volumétricos de 1000 mL
- 2 matraces volumétricos de 100 mL
- 1 cápsula de porcelana
- 1 soporte con pinzas para bureta
- 2 matraces erlenmeyer de 125 mL
- 1 pipeta de 10 mL
- 2 frascos goteros de 100 mL

REACTIVOS

- Solución Buffer PH 10
Disolver 6.56 gr. de NH_4Cl y 57 mL de NH_4OH en agua destilada y aforar a 100 mL.

- Solución De Erio cromo Negro T
Disolver 0.5 g de Erio cromo negro T y 4.5 gr. de clorhidrato de hidroxilamina en 100 mL de etanol.
- Solución De EDTA (sal disódica)
Disolver 2 gr de EDTA (sal disódica) más 0.05 gr de $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ en agua destilada y aforar a 1000 mL.
- Solución de $CaCl_2$ 0.01 N Disolver 0.5 gr de $CaCO_3$ secado a 110 °C durante 2 horas y disolverlo en 10 mL de HCl 3N y aforar a 1000 mL con agua destilada.

ESTANDARIZACIÓN

La estandarización del EDTA (sal di sódica) se hace de la siguiente manera: Colocar 5 mL de solución de $CaCl_2$ en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, se añaden 5 gotas de solución buffer de pH 10 y 3 gotas de indicador de Erio cromo negro T, aparece un color púrpura en presencia de iones de calcio y magnesio, y se procede a titular con la solución de EDTA cuya normalidad se desea conocer, se termina hasta la aparición de un color azul.

La Normalidad del EDTA se calcula así:

$$N_2 = \frac{V_1 \times N_1}{V_2}$$

Dónde :

N_2 = Normalidad del EDTA

V_1 = mL de solución de $CaCl_2$

N_1 = normalidad de la solución de $CaCl_2$

V_2 = mL gastados de EDTA

PROCEDIMIENTO

1. Colocar 5 mL de la muestra de agua en un matraz erlenmeyer de 125 mL
2. Agregar 5 gotas de buffer PH 10
3. Añadir 3 gotas de erio cromo negro T
4. Titular con EDTA (sal di sódica) 0.01 N
5. Vire de púrpura a azul

CÁLCULOS

$$\text{meq/l Ca}^{+2} \text{ y Mg}^{+2} = \frac{V \times N \times 1000}{\text{mL de muestra}}$$

Dónde :

V = mL gastados de EDTA

N = Normalidad del EDTA

Cálculos para Magnesio:

$$\text{meq L / Mg}^{+2} = [\text{meq/L (Ca}^{+2} \text{ y Mg}^{+2})] - (\text{meq/L Ca}^{+2})$$

Cálculos para Dureza Total : Expresada como ppm de CaCO₃

$$\text{mg/L de Dureza Total} = [\text{meq/L (Ca}^{+2} \text{ y Mg}^{+2})] * (50) \text{ como}$$

Cálculos para Dureza de Calcio : Expresada como ppm de CaCO₃

$$\text{mg/L Dureza de Calcio} = (\text{meq/L Ca}^{+2}) * (50)$$

Cálculos para Dureza de Magnesio : Expresada como ppm de CaCO₃

$$\text{mg/L Dureza de Magnesio} = (\text{meq/L Mg}^{+2}) * (50)$$

Bibliografía : American Society for testing and Materials. Annual book of Standards 1994.

Determinación de dureza en agua. Metodo ASTM D 1126-92 Standard methods for the examination of water and waste water publicado por la APHA.

Determinación de Dureza en agua Método 2340 C, 1995.

ANEXO 2

EJEMPLO DE CALCULO DE LOS METODOS ANALÍTICOS

2.1 CALCULOS PARA DIÓXIDO DE CARBONO

A2.1.1 NORMALIDAD DEL NaOH

Normalidad (NaOH) = gf de Biftalato de potasio/ mL NaOH* 0.204229

Donde: ml de NaOH = mililitros de solución de hidróxido de sodio consumidos en la estandarización.

Calculo de la normalidad del NaOH a preparar a partir de un volumen inicial de 12.5 mL de NaOH 0.1 N.

$$V_1N_1 = V_2N_2$$

$$V_2 = V_1N_1 / N_2$$

$$N_2 = 12.5 \text{ mL} * 0.1 \text{ N} / 500 \text{ mL}$$

$$N_2 : 0.0025 \text{ N}$$

Donde : V_1 = Volumen de hidróxido de sodio a utilizar

N_1 = Normalidad de hidróxido de sodio a utilizar

V_2 = Volumen final de hidróxido de sodio

N_2 = Normalidad final de hidróxido de sodio

A2.1.2 CALCULO DE LOS mg/L DE DIÓXIDO DE CARBONO

$$\text{mg/L CO}_2 = (V_B * N_B * \text{mg/ meq CO}_2) / \text{Vol muestra} * 100$$

Donde

mg/L CO₂ = partes por millón de CO₂

V_B = Volumen de hidróxido de sodio

N_B = Normalidad real de hidróxido de sodio consumido en la titulación.

mg/ meq CO₂ = 44 / 2 miligramos por mili equivalente de CO₂

Vol muestra = Volumen de muestra analizada (20 mL)

A2.1.3 CALCULO DE LOS mg/L PARA UNA MUESTRA

Para un volumen gastado de Hidróxido de Sodio : 5 mL

N₂ = Normalidad del hidróxido de sodio : 0.0025 N

Volumen de muestra : 25 mL

mg/L CO₂ = (5ml* 0.0025 N* 22) / 10 * 100

mg/L CO₂ =2.75 mg/L

A2.2 CALCULOS PARA NITRATOS

A2.2.1 PREPARACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN (MÉTODO DE ADICIONES ESTÁNDAR)

En la tabla A2.1 se muestran las lecturas de los mV en la adición de solución patrón, el método se ha seguido como aparece en las determinaciones analíticas.

TABLA A2.1 MICRO LITROS AÑADIDOS DE SOLUCIÓN PATRÓN

| Micro litros añadidos de solución patrón de ion nitrato | Ppm del ion Nitrato | mV |
|---|---------------------|-----|
| 0 | 0 | 192 |
| 50 | 0.25 | 190 |
| 50 | 0.50 | 182 |
| 50 | 0.75 | 180 |
| 50 | 1.0 | 178 |
| 200 | 2.0 | 176 |
| 200 | 3.0 | 174 |
| 200 | 4.0 | 173 |
| 200 | 5.0 | 172 |

| Micro litros añadidos de solución patrón de ion nitrato | Ppm del ion Nitrato | mV |
|---|---------------------|-----|
| 200 | 6.0 | 171 |
| 200 | 7.0 | 170 |
| 200 | 8.0 | 162 |
| 200 | 9.0 | 154 |
| 200 | 10.0 | 151 |
| Solución preparada de 100 ppm | 100.0 | 146 |
| Solución preparada de 1000 ppm | 1000.0 | 120 |

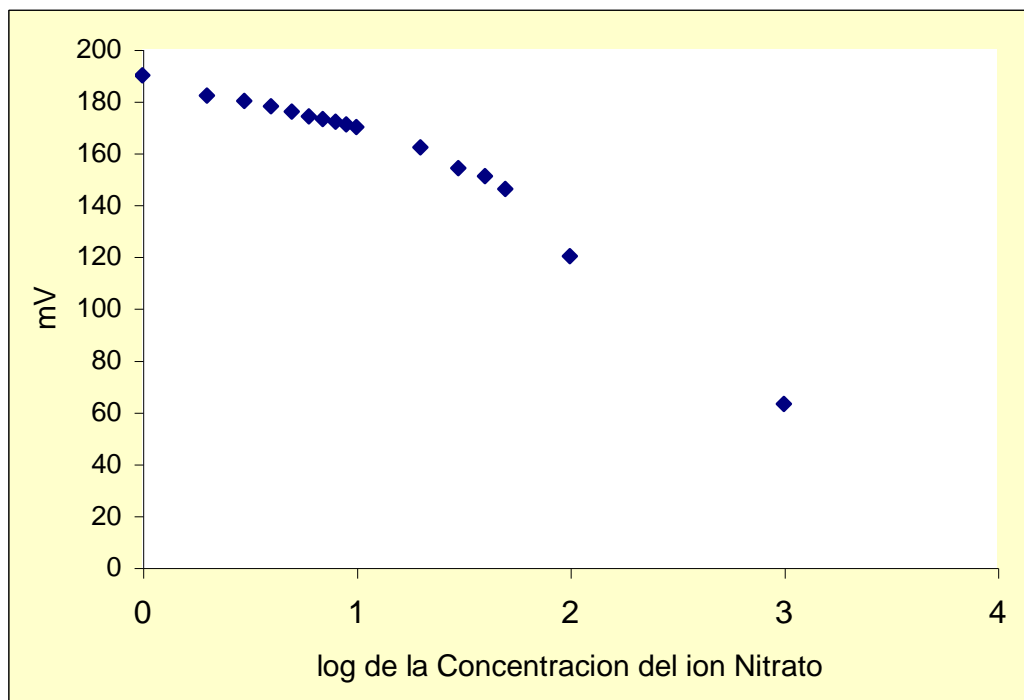
A continuación se grafica la respuesta analítica contra el logaritmo de la concentración. Los mV para 100 mg/L y 1000 mg/L se excluyeron del cálculo para mejorar el coeficiente de regresión, esto es válido siempre y cuando la concentración en las muestras esté dentro del rango de linealidad de la curva de ajuste.

TABLA A2.2 CALCULO DE LA FUNCIÓN GRAM

| ppm Cl- | log Conc | mV | Función gram |
|---------|------------|-----|--------------|
| 0 | | 192 | 0.14454398 |
| 1 | 0 | 190 | 0.15848932 |
| 2 | 0.30103 | 182 | 0.22908677 |
| 3 | 0.47712125 | 180 | 0.25118864 |
| 4 | 0.60205999 | 178 | 0.27542287 |
| 5 | 0.69897 | 176 | 0.30199517 |
| 6 | 0.77815125 | 174 | 0.33113112 |
| 7 | 0.84509804 | 173 | 0.34673685 |
| 8 | 0.90308999 | 172 | 0.36307805 |
| 9 | 0.95424251 | 171 | 0.3801894 |

| ppm Cl- | log Conc | mV | Función gram |
|---------|------------|-----|--------------|
| 10 | 1 | 170 | 0.39810717 |
| 20 | 1.30103 | 162 | 0.57543994 |
| 30 | 1.47712125 | 154 | 0.83176377 |
| 40 | 1.60205999 | 151 | 0.95499259 |
| 50 | 1.69897 | 146 | 1.20226443 |
| 100 | 2 | 120 | 3.98107171 |
| 1000 | 3 | 63 | 54.9540874 |

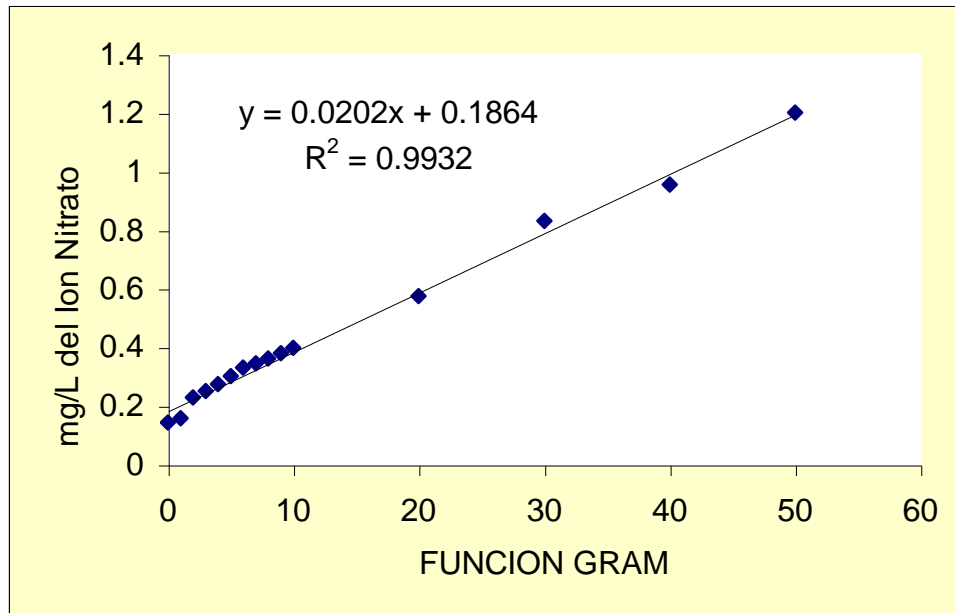
GRAFICO A2.1 log CONC-mV



A2.2.2 AJUSTE DE MINIMOS CUADRADOS PARA LA CURVA DE CALIBRACIÓN

El ajuste de la curva de calibración es aceptable cuando el coeficiente de regresión obtenido sea de 0.999... , en este ejemplo se obtuvo un coeficiente menor pero su diferencia no es significativa.

GRAFICA A2.2 AJUSTE DE MINIMOS CUADRADOS PARA LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA NITRATOS



A2.2.3 CALCULO DE LOS mg/L DEL ION NITRATO EN MUESTRAS DE AGUA

De la curva de regresión se tiene :

P : diferencia entre el valor leído a 10 mg/L – valor leído a 100 mg/L

P : 170 mV – 120 mV = 50 mV

m : pendiente de la curva : 0.0202

b : intercepto : 0.1864

$$\text{mg / L ion Nitrato} : \frac{(10^{-mV/P}) - b}{m}$$

TABLA A2.4 CALCULO DE LA CONCENTRACION DE NITRATOS

| Muestra | Lectura 1 | Lectura 2 | mg/L Nitrato | mg/L Nitrato | Promedio |
|-----------------|-----------|-----------|--------------|--------------|------------|
| Tanque Comunal | 178 | 179 | 4.40707279 | 3.7934059 | 4.10023934 |
| Testigo | 172 | 170 | 8.74643835 | 10.480553 | 9.61349568 |
| Tanque Familiar | 162 | 160 | 19.2594028 | 22.0077893 | 20.6335961 |

A2.3 CALCULOS PARA SULFATOS

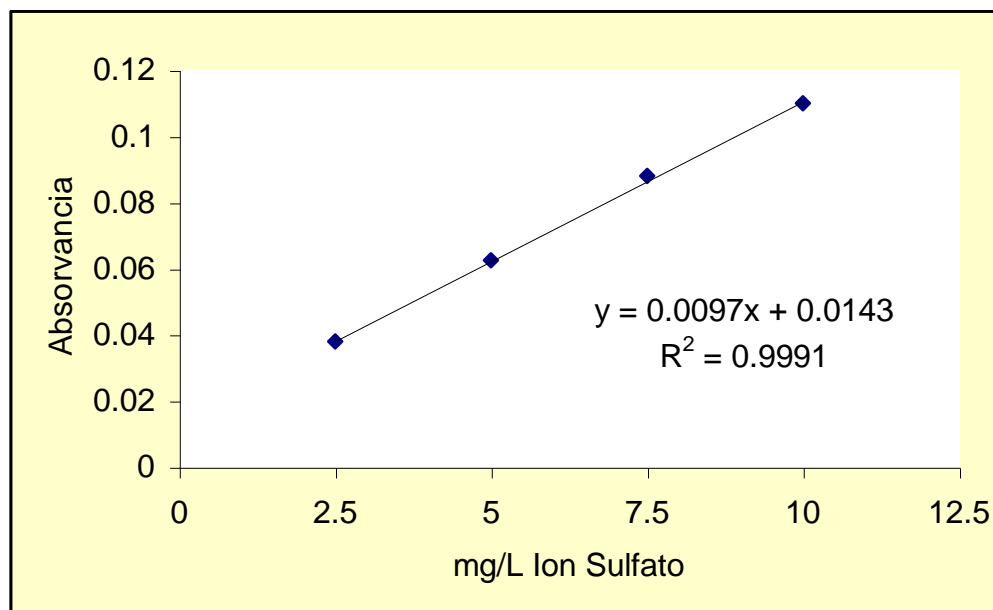
A2.3.1 CURVA DE CALIBRACIÓN

En la tabla A2.5 se enlistan los resultados de la medición de la absorbancia en las soluciones patrón del ion sulfato. La curva de calibración obtenida arroja un coeficiente de regresión de 0.9991 y de la ecuación respectiva se encuentran los valores de concentración del ion sulfato para las muestras.

TABLA A2.5 ABSORVANCIAS DE LAS SOLUCIONES PATRON

| Solución patrón (mg/L del ion sulfato) | Lectura 1 | Lectura 2 | Promedio |
|--|-----------|-----------|----------|
| 2.5 | 0.038 | 0.038 | 0.038 |
| 5.0 | 0.062 | 0.063 | 0.0625 |
| 7.5 | 0.088 | 0.088 | 0.088 |
| 10.0 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| 100.0 | 0.39 | 0.385 | 0.3875 |

GRAFICA A2.3 AJUSTE DE MINIMOS CUADRADOS PARA LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA SULFATOS



A2.3.2 ALCULO DE LOS mg/L DE SULFATOS PARA LAS MUESTRAS DE AGUA

De la curva de calibración se tiene :

m : pendiente de la curva : 0.0097

b : intercepto : 0.0143

$$mg / L Ion Sulfato : \left(\frac{Absorbancia - b}{m} \right)$$

TABLA A2.6 CALCULO DE LA CONCENTRACION DE SULFATOS

| Muestra | Lectura 1 | Lectura 2 | mg/L SO ₄ ⁻² | mg/L SO ₄ ⁻² | Promedio |
|-----------------|-----------|-----------|------------------------------------|------------------------------------|------------|
| Tanque Comunal | 0.04 | 0.04 | 2.64948454 | 2.64948454 | 2.64948454 |
| Testigo | 0.05 | 0.055 | 3.68041237 | 4.19587629 | 3.93814433 |
| Tanque Familiar | 0.048 | 0.054 | 3.4742268 | 4.09278351 | 3.78350515 |

A2.4 CALCULOS PARA CLORUROS

El procedimiento para generar la curva de calibración es igual que al de iones Nitrato, se sigue con el ajuste por mínimos cuadrados del cual se obtienen los parámetros para el cálculo de los mg/L de Cloruros.

A2.5 CALCULOS PARA DUREZA

A2.5.1 ESTANDARIZACIÓN

La Normalidad del EDTA se calcula así:

$$N_2 = \frac{V_1 \times N_1}{V_2}$$

Dónde :

N_2 = Normalidad del EDTA

V_1 = mL de solución de CaCl_2

N_1 = normalidad de la solución de CaCl_2

V_2 = mL gastados de EDTA

A2.5.2 CALCULO DEL FACTOR F

$$F = \text{meq/L Ca}^{+2} \text{ y Mg}^{+2} = \frac{V \times N \times 1000}{\text{ml de muestra}}$$

Dónde :

V = mL gastados de EDTA

N = Normalidad del EDTA

A2.5.3 CÁLCULOS PARA DUREZA TOTAL : EXPRESADA COMO mg/L DE



$$\text{mg/L de Dureza Total} = [\text{meq/L (Ca}^{+2} \text{ y Mg}^{+2})] * (500)$$

A2.5.4 DUREZA TOTAL DE MUESTRAS DE AGUA

Volumen de muestra : 25 mL

Volumen gastado de NaOH : 50 mL (estandarización)

Volumen gastado de NaOH en muestra : 5.8 mL

Normalidad del CaCl_2 : 0.001 N

Volumen de CaCl_2 : 25 mL

$$N_2 = (25 \text{ mL} * 0.001) / 50 \text{ mL}$$

$$N_2 = 0.0005 \text{ N}$$

$$F = \text{meq/L Ca}^{+2} \text{ y Mg}^{+2} = (5.8 * 0.0005 * 1000) / 25$$

$$F = 0.116$$

$$\text{mg/L de Dureza Total} = [\text{meq/L (Ca}^{+2} \text{ y Mg}^{+2})] * (500)$$

$$= 0.116 * 500$$

$$= 58 \text{ mg/L}$$

ANEXO 3

VALIDACIÓN DE METODOS ANALÍTICOS

INTRODUCCIÓN

Validar un método de análisis supone demostrar formalmente que posee un determinado nivel de parámetros analíticos básicos :Exactitud, Precisión, Linealidad / Función respuesta, Selectividad / Especificidad, Límite de Detección, Límite de Determinación, Robustez, Intervalo de trabajo, Incertidumbre, además de cumplir su idoneidad para el fin previsto en el contexto analítico. Sin embargo, los parámetros difieren según el objetivo del método de ensayo a validar, tal como se muestra en la tabla 1:

Tabla A3.1: PARÁMETROS A DETERMINAR EN LA VALIDACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS SEGÚN EL OBJETIVO DE LOS MISMOS.

| PARÁMETRO | CUALITATIVO | DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS | ANÁLISIS DE TRAZAS | PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS |
|--|-------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------|
| Exactitud | | * | * | * |
| Precisión | | * | * | * |
| Linealidad / Función Respuesta | | * | * | * |
| Selectividad / Especificidad | * | * | * | |
| Límite de detección | * | | * | |
| Límite de determinación (cuantificación) | | | * | |
| Robustez | * | * | * | * |
| Incertidumbre | * | * | * | * |

VALIDACIÓN DEL MÉTODO EMPLEADO EN EL ANÁLISIS DE IONES CLORURO : ELECTRODO SELECTIVO DEL ION CLORURO

1. CALIBRACIÓN LINEAL : Modelo de línea recta

1.1 INTRODUCCIÓN

El modelo de línea recta es el modelo más usado en calibración analítica, en parte debido a su soporte teórico en algunas aplicaciones analíticas (por ejemplo, la ley de Lambert-Beer), en parte debido a su simplicidad.

El modelo de línea recta consiste en encontrar la recta de calibrado que mejor se ajuste a una serie de n puntos experimentales, donde cada punto se encuentra definido por una variable x (variable independiente, generalmente concentración del analito de interés) y una variable y (variable dependiente, generalmente respuesta instrumental).

La recta de calibrado se encuentra definida por una ordenada en el origen (b_0) y una pendiente (b_1), a través de la ecuación

$$Y = b_0 + b_1x \quad (1)$$

El problema de la calibración analítica se reducirá a encontrar las estimaciones de los coeficientes de la recta de calibrado (ordenada en el origen y pendiente), y a asegurar que la recta encontrada se ajusta correctamente a los puntos experimentales (es decir, asegurar que no hay falta de ajuste).

El método más universalmente empleado para encontrar los coeficientes de la recta de calibrado es el método de mínimos cuadrados.

VALIDACIÓN DEL MODELO DE LÍNEA RECTA

La validación de un modelo, es decir, la confirmación de que el modelo es adecuado para nuestra finalidad, es tan importante como su establecimiento.

Tradicionalmente, la validación del modelo de línea recta se suele llevar a cabo mediante la comprobación del coeficiente de determinación (r^2). El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación (r). El coeficiente de determinación nos proporciona la correlación entre las variables x e y . Este valor se encuentra siempre comprendido entre -1 y 1 . Tradicionalmente se ha considerado que un valor de r^2 superior a 0.99 parece garantizar la bondad del ajuste de los puntos experimentales a la recta de calibrado.

El coeficiente de determinación es una herramienta para determinar, de forma preliminar, la linealidad de la recta de calibrado y el grado de ajuste de los puntos experimentales a la misma, pero no debería ser la única herramienta en utilizarse. La utilización del coeficiente de determinación, junto con un examen visual del gráfico de los residuales, nos da una visión conjunta mucho más completa de la validez de la recta de calibrado obtenida.

El residual de cada punto experimental es la distancia vertical de cada punto a la recta de calibrado. Un gráfico de residuales no es nada más que una representación de la coordenada x de cada punto experimental respecto a su valor residual. Para poder considerar que un modelo de línea recta es válido, en el gráfico de residuales se debe observar que:

1. El número de residuales positivos es aproximadamente igual al número de residuales negativos.
2. Los residuales están distribuidos aleatoriamente.
3. Los residuales tienen todos aproximadamente el mismo valor absoluto, y
4. Los residuales no muestran tendencias.

1.2 VALIDACION DEL MODELO LINEAL PARA CLORUROS

1.2.1. Respuesta obtenida en el método de la adiciones estándar.

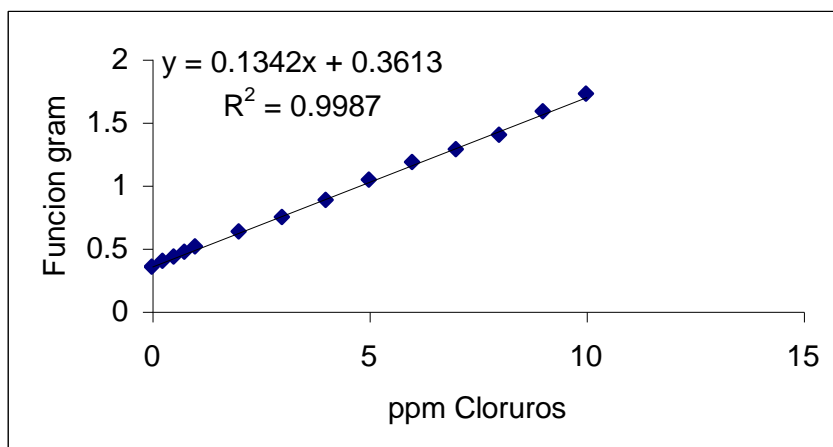
Para una curva de calibración se obtuvieron los siguientes resultados :

TABLA A3.2. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE CLORUROS POR EL MÉTODO DE ELECTRODOS SELECTIVOS

| ppm Cloruros | Log (Concentración) | Milivoltios (mV) | Función Gram. |
|--------------|---------------------|------------------|---------------|
| 0 | --- | 190 | 0.351119173 |
| 0.25 | -0.60205999 | 187 | 0.398107171 |
| 0.5 | -0.30103 | 185 | 0.432876128 |
| 0.75 | -0.12493874 | 183 | 0.470681656 |
| 1 | 0 | 181 | 0.511788955 |
| 2 | 0.30103 | 176 | 0.630957344 |
| 3 | 0.47712125 | 172 | 0.745980152 |
| 4 | 0.60205999 | 168 | 0.881971488 |
| 5 | 0.69897 | 164 | 1.042753889 |
| 6 | 0.77815125 | 161 | 1.182298865 |
| 7 | 0.84509804 | 159 | 1.285555732 |
| 8 | 0.90308999 | 157 | 1.397830607 |
| 9 | 0.95424251 | 154 | 1.584893192 |
| 10 | 1 | 152 | 1.723310906 |

1.2.2. Construcción de la curva de calibración

GRAFICA A3.1 CURVA DE CALIBRACIÓN PARA CLORUROS



1.2.3. Cáculo de los residuales

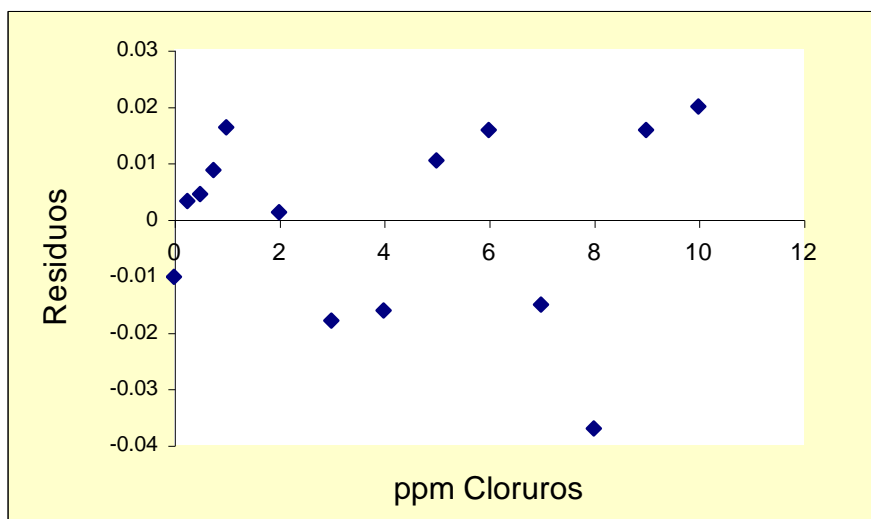
$$\text{Residuo} = y - y' \quad (2)$$

TABLA A3.3 CALCULO DE LOS RESIDUOS

| Ppm Cloruros (x) | Función gram (y) | Función gram a partir del ajuste (y') | Residuo |
|------------------|------------------|---------------------------------------|-------------|
| 0 | 0.35111917 | 0.3613 | -0.01018083 |
| 0.25 | 0.39810717 | 0.39485 | 0.00325717 |
| 0.5 | 0.43287613 | 0.4284 | 0.00447613 |
| 0.75 | 0.47068166 | 0.46195 | 0.00873166 |
| 1 | 0.51178896 | 0.4955 | 0.01628896 |
| 2 | 0.63095734 | 0.6297 | 0.00125734 |
| 3 | 0.74598015 | 0.7639 | -0.01791985 |
| 4 | 0.88197149 | 0.8981 | -0.01612851 |
| 5 | 1.04275389 | 1.0323 | 0.01045389 |
| 6 | 1.18229887 | 1.1665 | 0.01579887 |
| 7 | 1.28555573 | 1.3007 | -0.01514427 |
| 8 | 1.39783061 | 1.4349 | -0.03706939 |
| 9 | 1.58489319 | 1.5691 | 0.01579319 |
| 10 | 1.72331091 | 1.7033 | 0.02001091 |

1.2.4. Construcción de la grafica de residuos

GRAFICA A3.2 RESIDUOS PARA CLORUROS



1.2.5. Conclusiones

La grafica de residuos no muestra ninguna tendencia y los datos se distribuyen aleatoriamente. Además, los residuos están dentro de un rango muy limitado entre 0,01 y 0,02 tanto arriba como en los valores negativos, se puede decir que es valida a la asunción de linealidad del modelo.

2. EXACTITUD DEL MÉTODO

2.1 INTRODUCCION

Indica la capacidad del método analítico para obtener resultados lo más próximos posibles al valor verdadero o de referencia. La evaluación de este parámetro, en un laboratorio de ensayos, requiere del valor de referencia, el cual debe ser suministrado junto con los materiales de referencia (patrones) adquiridos.

Mediante pruebas estadísticas, se compara el valor obtenido de los patrones analizados por el laboratorio, con respecto al valor verdadero o de referencia.

Las diferencias (Sesgo) entre los valores obtenidos y el patrón ,se deben fundamentalmente a errores sistemáticos. Si el valor del sesgo excede los requisitos legales o criterios técnicos del laboratorio, se deberán tomar acciones correctivas necesarias evaluando nuevamente la calidad del proceso analítico.

La exactitud se define con la ecuación :

$$Exactitud = \mu - xt \quad (3)$$

donde μ es la media de la población para la concentración de un analito de una muestra cuya concentración verdadera es xt . Para determinar la exactitud hay que analizar uno o varios materiales estándar de referencia, cuyas concentraciones de analito se conozcan. Sin embargo, los resultados de dichos análisis contendrán tantos errores aleatorios como errores sistemáticos, a menos que se realicen suficientes análisis para que el error aleatorio se reduzca a un valor próximo a cero. La media de 20 a 30 análisis repetidos puede suponerse, normalmente, que esta libre de errores aleatorios y, en consecuencia ser una buena estimación de la media de la población μ en la ecuación anterior.

2.2 CALCULO DE LA EXACTITUD

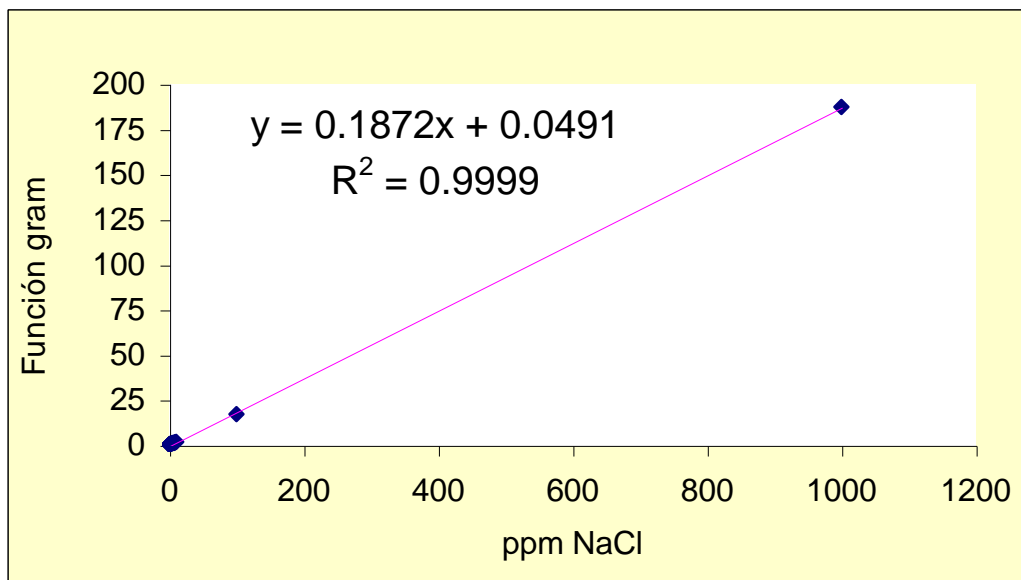
Para el calculo e la exactitud se utilizó como muestra patrón de referencia, una solución (tritisol) de NaCl con una concentración de 1 gr/L (1000 mg/L) de NaCl. Ya que el método mide en forma indirecta la concentración del ión cloruro (Cl^{-1}) y no la concentración de NaCl, .se hizo la conversión de este patrón a concentración de ion cloruro :

$$1000 \text{ ppmNaCl} = 1.65 \text{ grNaCl / Litro}$$
$$1 \text{ grNaCl} = 606.06 \text{ ppm} (Cl^{-1})$$

De esta solución se tomaron 12 muestras las cuales dieron los siguientes resultados en mV. También se presentan los cálculos de la función gram , de la curva de calibración y las ppm de Cl^{-1} resultantes :

La curva de calibración arrojó los siguientes resultados :

GRAFICA A3.3 CURVA DE CALIBRACION CLORUROS PARA EL CALCULO DE LA EXACTITUD



El calculo de la concentración de NaCl es :

TABLA A3.4 CALCULO DE LA COCENTRACION DE CLORUROS

| MV | Función Gram | mg/L Cloruros |
|--------------------|--------------|-------------------|
| 52 | 113.3823501 | 605.412661 |
| 52 | 113.3823501 | 605.412661 |
| 52 | 113.3823501 | 605.412661 |
| 53 | 108.7335673 | 580.579419 |
| 52 | 113.3823501 | 605.412661 |
| 52 | 113.3823501 | 605.412661 |
| 51 | 118.2298865 | 631.30762 |
| 52 | 113.3823501 | 605.412661 |
| 52 | 113.3823501 | 605.412661 |
| 52 | 113.3823501 | 605.412661 |
| 52 | 113.3823501 | 605.412661 |
| 52 | 113.3823501 | 605.412661 |
| No mediciones : 12 | | Promedio : 605.50 |

Volviendo a la ecuación (3) :
 Promedio = 605.50 mg/L

Concentración de la solución estándar : 606.06

Exactitud = $\mu - x_t$

Exactitud = 605.50 – 606.06

Exactitud = -0.56 mg/L

3. PRECISIÓN DEL MÉTODO

3.1 INTRODUCCIÓN

La precisión cuantifica la dispersión de una serie repetida de ensayos analíticos obtenidos sobre una muestra en el mismo laboratorio, con el método a validar. Depende de errores aleatorios.

Se puede evaluar en dos condiciones diferentes: Repetibilidad, según que los resultados que integran la serie se obtengan consecutivamente uno tras otro, utilizando la misma muestra, analizada por el mismo analista, con los mismos equipos y reactivos, o de Reproducibilidad, en sesiones diferentes tales como distintos días, diferentes analistas, etc.

La cuantificación del parámetro que caracteriza a este estudio, es la desviación estándar, (S) o preferiblemente su expresión relativa, el coeficiente de variación. Si bien algunos autores utilizan el término coeficiente de variación, IUPAC - Unión Internacional de Física Pura y Aplicada - recomienda el uso de Desviación Estándar Relativa, (DER). [19].

Para la mayoría de los métodos analíticos el coeficiente DER de la reproducibilidad debe ser menor que un 2,0 %.[4,10]. Los parámetros de calidad de la precisión se encuentran definidos en la tabla 4.

TABLA A3.5. PARÁMETROS DE CALIDAD PARA LA PRECISIÓN DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS.

| Término | Definición |
|---|--|
| Varianza | $s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N - 1} \quad (4)$ |
| Desviación estándar absoluta | $s = \sqrt{s^2} \quad (5)$ |
| Desviación estándar relativa ,(RSD) | $RSD = \frac{s}{\bar{X}} \quad (6)$ |
| Desviación estándar de la media , S_m | $S_m = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (7)$ |
| Coefficiente de variación, CV | $CV = \frac{s}{\bar{X}} (100) \quad (8)$ |

Donde :

\bar{X} = promedio de las observaciones

x_i = observaciones

N = número de observaciones

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{N} \quad (9)$$

3.2 CALCULO DE LA PRECISION DEL MÉTODO

A continuación se presentan los resultados de la medición de cloruros en la etapa de tratamiento de agua lluvia. No se utilizaron los datos de la caracterización fisicoquímica ya que la cantidad de datos es muy pequeña como para ser utilizada en la determinación de la precisión del método. Sin embargo el método es el mismo.

TABLA A3.6 . RESUMEN DE ESTADÍSTICOS. VARIABLE :
CONCENTRACION DEL ION CLORURO EN mg/L

| Estadístico | Punto de muestreo 1 | Punto de muestreo 2 | Punto de muestreo 3 | Punto de muestreo 4 | Punto de muestreo 5 |
|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| No de Datos | 9 | 4 | 4 | 3 | 2 |
| Mínimo | 0.1262 | 0.09 | 0.5 | 3.8 | 0.507 |
| Máximo | 2.82 | 1.11 | 1.99 | 4.12 | 0.88 |
| Rango | 2.6938 | 1.02 | 1.49 | 0.32 | 0.373 |
| Promedio | 1.22 | 0.6157 | 1.36 | 4.00 | 0.6935 |
| Desviación estándar promedio | 1.1007 | 0.5657 | 0.6353 | 0.1793 | 0.2637 |
| Desviación relativa promedio | 0.8967 | 0.9189 | 0.46717 | 0.0447 | 0.3803 |

El coeficiente DER de la reproducibilidad es menor que uno en todos los puntos de muestreo.

4. ROBUSTEZ

Es el grado de reproducibilidad de los resultados obtenidos mediante la ejecución del método sobre una misma muestra variando algunas condiciones operacionales, como por ejemplo diferentes días, analistas, concentraciones, temperaturas, etc.

La comprobación de este parámetro resulta relevante en métodos de análisis complejos y de rutina, dado que las muestras pueden estar sometidas a diferentes etapas de tratamiento (digestión, filtrado, extracción, etc.), que tienden a romper la cadena de Trazabilidad.

5.0 INCERTIDUMBRE

Se refiere a la variabilidad asociada al proceso analítico, involucrando todas las etapas del mismo (muestreo, submuestreo, tratamiento de la muestra).

6.0 LIMITE DE DETECCIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de las curvas de calibración que se usan en química analítica son lineales y pueden describirse por la ecuación :

$$S = mC + S_{bl} \quad (10)$$

En la que S es la señal medida, C es la concentración del analito, S_{bl} es la señal instrumental para un blanco y m es la pendiente de la línea recta.

El límite de detección es la concentración mínima que puede determinarse con un nivel aceptable de exactitud y precisión. Se establece examinando una muestra o material de referencia apropiado.

La definición cualitativa más aceptada del límite de detección viene dada por la concentración o el peso mínimo de analito que pueden detectarse para un nivel de confianza dado. Este límite depende de la relación entre la magnitud de la señal analítica y el valor de las fluctuaciones estadísticas de la señal del blanco. Esto es, al menos que la señal analítica sea mayor que la del blanco en un múltiplo k de las variaciones del blanco debidas a errores aleatorios, no será posible detectar con certeza la señal analítica. Así, cuando nos aproximamos al límite de detección, la señal analítica se aproxima a la señal media del blanco S_{bl} . La mínima señal distinguible S_m se toma por tanto como la suma de la señal media del blanco S_{bl} más un múltiplo k de la desviación estándar del mismo. Esto es,

$$S_m = S_{bl} + K * \text{Desviación estándar de } (S_{bl}) \quad (11)$$

Experimentalmente S_m puede determinarse realizando 20 a 30 medidas del blanco, preferiblemente a lo largo de un periodo de tiempo extenso. A continuación, los datos se tratan estadísticamente para obtener S_{bl} y su desviación estándar.

Al final se sustituye S_m de la ecuación (11) en la ecuación (10) y la expresión resultante se reordena para dar la ecuación (12), e la que C_m es por definición el límite de detección.

$$C_m = \frac{S_m - S_{bl}}{m} \quad (12)$$

El valor de K ha sido definido como de $K = 3$ por diversos autores (H. Kaiser , Anal. Chem., 1987, 42, 53A). A este valor de K el nivel de confianza de la detección es como mínimo de un 89% en todos los casos. Asimismo H. Kaiser argumenta que se gana muy poco si se usa un valor mayor de k y por tanto un mayor nivel de confianza. Long y Winefordner, en un estudio reciente sobre límites de detección, también recomiendan la utilización de $K = 3$.

6.2 CALCULO DEL LIMITE DE DETECCIÓN PARA CLORUROS

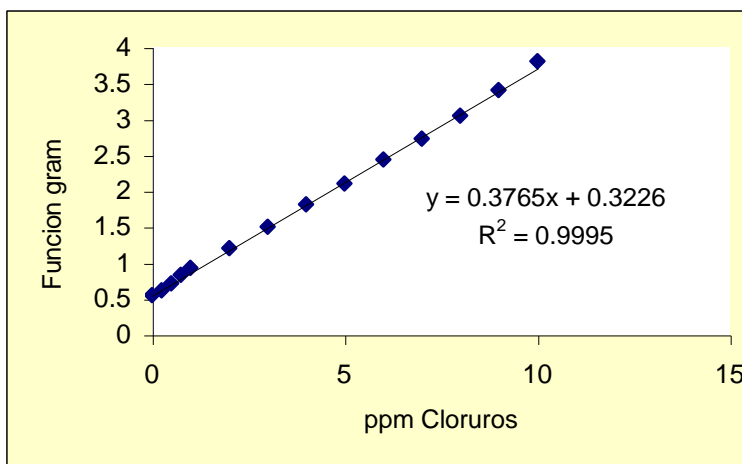
A continuación se presentan los resultados de una curva de calibración en la medición de cloruros por el método de electrodos selectivos.

TABLA A3.7 RESULTADOS DE UNA CURVA DE CALIBRACIÓN EN LA MEDICIÓN DE CLORUROS

| ppm Cloruros | mV |
|--------------|-----|
| 0 | 202 |
| 0.25 | 199 |
| 0.5 | 195 |
| 0.75 | 191 |
| 1 | 188 |
| 2 | 181 |
| 3 | 175 |
| 4 | 170 |
| 5 | 166 |
| 6 | 162 |
| 7 | 159 |
| 8 | 156 |
| 9 | 153 |
| 10 | 150 |

La regresión por mínimos cuadrados dio el siguiente resultado :

GRAFICA A3.4 CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL CALCULO DEL LIMITE DE DETECCIÓN PARA CLORUROS



A continuación se presenta los valores de los mV para la concentración del blanco realizado en siete curvas de calibración que se construyeron al inicio del análisis fisicoquímico del agua lluvia.

El calculo del limite de detección para esta curva de calibración se presenta en la tabla siguiente.

Sbl = 202 Mv

TABLA A3.8 CALCULO DEL LIMITE DE DETECCIÓN (CM)

| | |
|------------------------|--|
| Señal del blanco (mV) | Desviación estándar : 34.80 |
| 202 | $S_m = S_{bl} + K * \text{Desviación estándar de } (S_{bl})$ $S_m = 202 + 3 * 34.80 / 202 = 202.516874$ |
| 198 | $S_m - S_{bl} = 202.516874 - 202 = 0.516873952$ |
| 201 | Pendiente m = 0.3765 |
| 202 | $C_m = C_m = \frac{S_m - S_{bl}}{m} = 0.526873 / 0.3765$ |
| 281 | |
| 205 | |
| 263 | |
| | $C_m = 1.3728 \text{ mg/L}$ |

7.0 LIMITE DE CUANTIFICACION

Es la concentración más pequeña con la que pueden realizarse medidas cuantitativas.

Como limite inferior de las medidas cuantitativas se toma, en general, aquel que es igual a diez veces la desviación estándar cuando la concentración del analito es cero ($10 * S_{bl}$). En este punto la desviación estándar relativa es del orden de un 10 % y disminuye con rapidez cuando las concentraciones aumentan.

$$\text{Limite de Cuantificación} = \text{LOQ} = 10 * C_m \quad (13)$$

$$\text{Limite de Cuantificación} = \text{LOQ} = 10 * 1.3728$$

$$\text{Limite de Cuantificación} = \text{LOQ} = 13.73 \text{ mg/L}$$

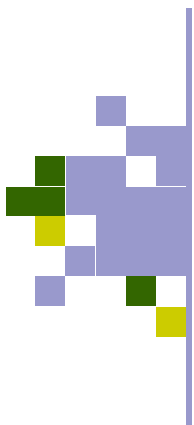
ANEXO 4

REQUISITOS DE CALIDAD FISICO-QUÍMICA

TABLA A4. REQUISITOS DE CALIDAD FISICO-QUÍMICA PARA AGUA POTABLE (NORMA OBLIGATORIA SALVADOREÑA, NSO #01ES/2000)

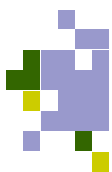
| PARAMETRO | UNIDAD | VALOR RECOMENDADO | VALOR MAXIMO ADMISIBLE |
|-------------------------------------|-------------|-------------------|--|
| Temperatura | °C | 18 a 30 | Queda sujeto a condiciones de potabilidad de la fuente |
| pH | --- | 6.0-8.5 | --- |
| Conductividad Eléctrica | μSiemens/cm | 500 | 1,600 |
| Dióxido de Carbono | mg/L | No disponible | No disponible |
| Nitratos | mg/L | 45 | --- |
| Sulfatos | mg/L | 25 | 250 |
| Cloruros | mg/L | 25 | 250 |
| Dureza Total como CaCO ₃ | mg/L | 100 | 400 |

ANEXO 5
MANUAL DEL MUESTREADOR



**MANUAL
DEL MUESTREADOR
DE
AGUA
LLUVIA**

NOMBRE DEL MUESTREADOR :



MANUAL DEL MUESTREADOR

INTRODUCCIÓN

El trabajo que lleva acabo el muestreador es sumamente importante ya que una muestra mal tomada no permitirá conocer la composición exacta del agua que se pretenda representar, aunque sea analizada cuidadosamente y además malgasta el trabajo de laboratorio.

Tanto el recipiente colector, como los frascos almacenadores de muestras utilizados, no deben contaminarse en su interior. Los frascos a utilizar deben ser plásticos y nuevos. Deben lavarse con agua lluvia de muestra.

UBICACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO.

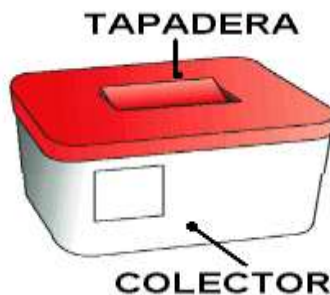
- De ser posible, el punto de muestreo deberá estar ubicado en un sitio pavimentado, en una segunda planta de una casa o edificio, sobre techo. En el caso, de que el sitio estuviera localizado sobre el suelo o grama, deberá utilizar un banco alto para colocar el colector.
- No debe estar colocado muy cerca de paredes o desagües de casas.
- No debe estar debajo de la sombra de árboles o cerca de ellos.
- Debe evitarse cualquier situación o condición que contamine la muestra.

KIT DEL MUESTREADOR

A Usted se le ha proporcionado el siguiente material (Kit) para que pueda recolectar el agua lluvia :



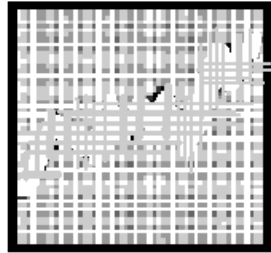
1. Un manual del muestreador



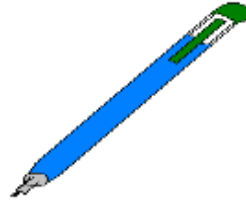
2. Un colector con su tapadera



MANUAL DEL MUESTREADOR



4. Una zaranda de plástico



5. Una regla graduada trasparente y lapicero



6. Una cinta teflón.



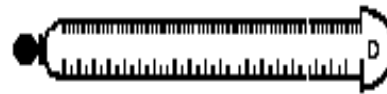
7. Viñetas



8. Tirro



9. Dos bolsas plásticas



10. Un termómetro



MANUAL DEL MUESTREADOR

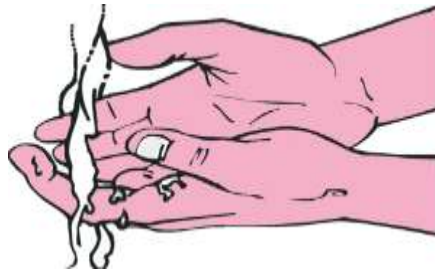


11. Un medidor de pH



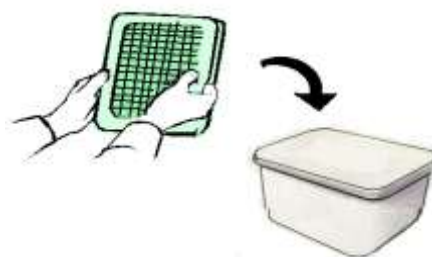
12. Una caja para guardar el Kit

1. COMO VAMOS A OBTENER EL AGUA LLUVIA ?



ES IMPORTANTE LAVARSE LAS MANOS ANTES DE CUALQUIER OPERACIÓN !!!

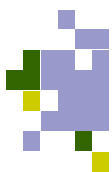
1. Primero **OBSERVE SU COLECTOR** para ver si se encuentra limpio y que esté completamente seco. Si no está limpio, lávelo y póngalo al sol hasta que esté completamente seco.
2. Asegúrese que la zaranda esté completamente limpia y seca.



3. Coloque la zaranda sobre el colector sin tapadera y ubíquelo a estos en el lugar donde va a tomar el agua lluvia.



4. Anote el día, y la hora a la que inicia la lluvia.



MANUAL DEL MUESTREADOR

6. Una vez que tenga una cantidad de agua suficiente , proceda a medir la temperatura.
7. Proceda a medir el pH del agua.
8. Cuando la lluvia haya terminado, proceda a medir la temperatura final.
9. Anote la hora en que finalizó.
10. Anote cualquier observación que considere importante.
11. La recolección de agua lluvia se realizará una vez por semana.

2. PROCEDIMIENTO PARA MEDIR LA TEMPERATURA DEL AGUA LLUVIA.

EL TERMOMETRO ES UN INSTRUMENTO QUE MIDE LA TEMPERATURA DEL AGUA. ES SUMAMENTE DELICADO YA QUE ESTÁ CONSTRUIDO EN VIDRIO, TENGA EL CUIDADO NECESARIO.

1. Tome una cantidad de agua lluvia en un recipiente que esté limpio y colóquelo en un lugar limpio. Antes de usar el recipiente, enjuáguelo con agua lluvia
2. Coloque cuidadosamente el termómetro sumergiéndolo en la muestra de agua.



3. Espere un de tiempo 3 minutos o el suficiente que permita obtener una lectura constante en el termómetro.
4. Una vez constante la lectura en el termómetro, anótela como la temperatura de la muestra en la hoja que se le ha dado para ello.
5. Repita el procedimiento (hacer dos lecturas), siguiendo el proceso descrito al inicio de la lluvia y cuando finaliza.
5. Se tomará la temperatura una vez por semana.

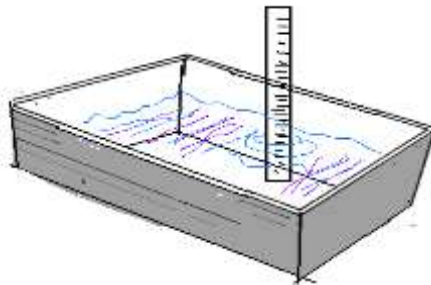


MANUAL DEL MUESTREADOR

3. PROCEDIMIENTO PARA MEDIR EL VOLUMEN DE AGUA PRECIPITADO

Con la regla plástica graduada mida la cantidad de agua que ha caído.

1. Coloque la regla dentro del colector pegada a una pared del colector .



1. Lea la altura a la que alcanza a mojar el agua a la regla.
2. Anótela en la hoja para anotaciones.

Se tomará el volumen precipitado una vez por semana.

4. COMO SE MIDE EL pH ?

1. Quite el capuchón del medidor y sumerja el bulbo en la solución de pH 4
2. Lave el bulbo con agua destilada
3. Sumerja el bulbo en la solución de pH 7
4. Lave el bulbo con agua destilada
5. Seque el bulbo e introdúzcalo en la muestra de agua
6. Repita este procedimiento dos veces
7. Lea la lectura del medidor y anótela



MANUAL DEL MUESTREADOR

4. PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE MUESTRAS PARA ALMACENAR

Usted dispone de frascos plásticos para la toma de una muestra de agua y de un frasco color ámbar para la toma de una segunda muestra. DESPUES de que la lluvia haya terminado y el colector tenga suficiente agua, es momento de tomar muestras para almacenarlas .A continuación se presenta el procedimiento a seguir :

1. Lávese las manos antes de comenzar a tomar las muestras



1. Verificar que el frasco almacenador de muestra disponga de su respectiva viñeta con los siguientes datos :

Punto : _____

Fecha que llueve : _____

Hora de inicio de la lluvia : _____ Hora final : _____

Milímetros Precipitados : _____

pH : _____ Temperatura inicio _____

Temperatura final : _____

Nombre del muestreador : _____

Observaciones : _____

2. Verificada la viñeta, ésta se llena según los datos pedidos en el momento oportuno.
3. Luego se quita la zaranda del colector, tomándolo por el borde (procurar no tocar por dentro a la zaranda).
4. Sin tocar el colector por dentro, tomándolo por el borde, inclínelo y llene el frasco almacenador de muestra hasta que revalse .



MANUAL DEL MUESTREADOR

luego taponarlo herméticamente utilizando cinta teflón en la rosca del frasco.

5. Guarde las muestras en la hielera CON HIELO ,no debe moverse innecesariamente.
6. Recolectada la muestra y almacenada, el colector y la zaranda deben lavarse con agua lluvia .
7. Inclínelos para eliminar lo restante de agua que pueda quedar.
8. Seque el colector al sol.
9. Una vez secos estos, guárdelos en bolsas plásticas para evitar se contamine con grasas, partículas finas y/o extrañas.
10. La toma de muestra se hará cada dos semanas.

