

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEI SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS



**DETERMINACIÓN DE GRADO DE VULNERABILIDAD DE LAS
AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CIUDAD DE TARIJA Y
PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LOS POZOS DENTRO DE LA
CONCESIÓN DE COSAALT R.L.**

PATRICIA CONDORI MARTINEZ

Proyecto presentado a consideración de la Universidad Autónoma "Juan Misael Saracho", como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE II - 2022

TARIJA – BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS

**DETERMINACIÓN DE GRADO DE VULNERABILIDAD DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS DE LA CIUDAD DE TARIJA Y PERÍMETROS DE PROTECCIÓN
DE LOS POZOS DENTRO DE LA CONCESIÓN DE COSAALT R.L.**

PATRICIA CONDORI MARTINEZ

PROYECTO ELABORADO EN LA ASIGNATURA CIV 502

SEMESTRE II - 2022

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA

A mi mamá Felicidad y a mi papá Carlos que son las personas más fuertes que conozco, son el impulso que tengo para ser una persona de bien en la vida, a ella que estuvo en todo momento al lado mío, sin ella no lo hubiera podido lograr, a él que siempre creyó, confió en mí y en mis capacidades.

A mis hermanas Gladys, Nataly y mi hermano Jesús que me cuidaron y apoyaron en todo momento para que pueda cumplir mis objetivos.

A mis tíos, tías, primos, primas por el cariño que me tienen y su ayuda sincera que me dieron. A mi mamá Margarita y en eterna memoria a mi papá Aniceto por dejar los buenos valores y buenos hábitos en toda la familia, estos siempre influenciaron en mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme una gran familia, por nunca desampararme y llenar de bendiciones mi vida.

A mis papas por ser parte de mi educación y siempre impulsarme a hacer las cosas bien, por darme el buen ejemplo de la buena voluntad, el sacrificio del trabajo, responsabilidad y respeto.

A mis hermanos y cuñados por ser perseverantes conmigo, por estar siempre preocupados y pendientes por mí, agradecida y atenta a todos sus consejos y recomendaciones para ser una buena persona y una buena profesional.

A mis tíos, tías, primos, primas y abuelita, agradecida por todo su apoyo, amabilidad, por todo el cariño que recibo de su parte y siempre estar en sus pensamientos.

A mis amigos de colegio y universidad por siempre alegrarse por mí y mis logros, por sus buenos deseos, por su paciencia, lealtad y apoyo incondicional que me dan.

Al ingeniero Gualberto Alarcón que me ayudó y orientó a realizar mi trabajo de fin de grado, gracias por compartirme sus conocimientos, su interés por la investigación, por su tiempo y su paciencia.

A los docentes de la carrera de ingeniería civil de la universidad UAJMS por compartir valiosos conocimientos, anécdotas y consejos, por la dedicación que tienen a nuestra formación académica para que seamos buenos profesionales en la vida.

Gracias a todos ...

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I	¡Error! Marcador no definido.
1. GENERALIDADES	¡Error! Marcador no definido.
1.1. INTRODUCCIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	¡Error! Marcador no definido.
1.3. HIPÓTESIS.....	¡Error! Marcador no definido.
1.4. OBJETIVOS.....	¡Error! Marcador no definido.
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	¡Error! Marcador no definido.
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	¡Error! Marcador no definido.
1.5. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.....	¡Error! Marcador no definido.
1.6. LIMITACIÓN DEL ESTUDIO.....	¡Error! Marcador no definido.
1.7. ALCANCE DEL ESTUDIO.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO II	¡Error! Marcador no definido.
2. MARCO TEÓRICO	¡Error! Marcador no definido.
2.1. ANTECEDENTES.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2. EL AGUA SUBTERRÁNEA Y PROCESOS GEOLÓGICOS. .	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1. Litología, estratigrafía y estructura.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2.2. Importancia de las aguas subterráneas.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2.3. Dinámica del agua subterránea.....	¡Error! Marcador no definido.
2.3. ACUÍFERO.....	¡Error! Marcador no definido.
2.3.1. Clasificación de los sistemas de acuíferos.....	¡Error! Marcador no definido.
2.4. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS ACUÍFEROS.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5. VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS.....	¡Error! Marcador no definido.
2.6. CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS.....	¡Error! Marcador no definido.
2.6.1. Riesgo de contaminación de aguas subterráneas.....	¡Error! Marcador no definido.
2.7. MÉTODOS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	¡Error! Marcador no definido.

2.8. MÉTODO GOD.....	¡Error! Marcador no definido.
2.8.1. Definición de factores.....	¡Error! Marcador no definido.
2.9. MÉTODO DRASTIC.....	¡Error! Marcador no definido.
2.9.1. Definición de factores.....	¡Error! Marcador no definido.
2.10. MÉTODO AVI.....	¡Error! Marcador no definido.
2.10.1. Definición de factores.....	¡Error! Marcador no definido.
2.11. MÉTODO EKV.....	¡Error! Marcador no definido.
2.11.1. Definición de factores.....	¡Error! Marcador no definido.
2.12. CRITERIOS PARA LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE POZOS.	¡Error! Marcador no definido.
2.13. MÉTODOS PARA CREAR PERÍMETROS DE PROTECCIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
2.14. MÉTODO DE RADIO FIJO CALCULADO (R.F.C.) “FUNCIÓN DEL TIEMPO DE TRÁNSITO”.....	¡Error! Marcador no definido.
2.14.1. Definición de factores.....	¡Error! Marcador no definido.
2.15. MÉTODO DE WYSSLING.....	¡Error! Marcador no definido.
2.15.1. Definición de factores.....	¡Error! Marcador no definido.
2.16. CARTOGRAFÍA DE LA VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS.....	¡Error! Marcador no definido.
2.16.1. Aplicación de un sistema de información geográfica.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO III.....	¡Error! Marcador no definido.
3. MARCO METODOLÓGICO.....	¡Error! Marcador no definido.
3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DEL ÁREA DE ESTUDIO. ...	¡Error! Marcador no definido.
3.1.1. Características principales del área de estudio.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3. DETERMINACIÓN DE VARIABLES.....	¡Error! Marcador no definido.
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.

3.6. LIMITACIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO IV	¡Error! Marcador no definido.
4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN ACTUAL Y ANTECEDENTES REGIONALES.	¡Error! Marcador no definido.
4.2. ZONIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA OCURRENCIA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CIUDAD DE TARIJA.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE LOS POZOS QUE ESTÁN BAJO LA CONCESIÓN DE COSAALT R.L. Y TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN REALIZADOS.	¡Error! Marcador no definido.
4.4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL GRADO DE VULNERABILIDAD.....	¡Error! Marcador no definido.
4.4.1. Método GOD.	¡Error! Marcador no definido.
4.4.2. Método DRASTIC.....	¡Error! Marcador no definido.
4.4.3. Método AVI.....	¡Error! Marcador no definido.
4.4.4. Método Ekv.	¡Error! Marcador no definido.
4.5. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN.	¡Error! Marcador no definido.
4.5.1. Método Radio fijo calculado (R.F.C.)	¡Error! Marcador no definido.
4.5.2. Método Wyssling.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO V	¡Error! Marcador no definido.
5. APLICACIÓN PRACTICA.	¡Error! Marcador no definido.
5.1. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA HALLAR GRADOS DE VULNERABILIDAD.....	¡Error! Marcador no definido.
5.2. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA HALLAR PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE LOS POZOS.....	¡Error! Marcador no definido.
5.3. RESULTADOS Y COMPARACIÓN DE ENTRE METODOLOGÍAS.....	¡Error! Marcador no definido.
5.4. GENERACIÓN DE MAPAS DE NIVELES DE VULNERABILIDAD Y DELIMITACIÓN DE PERÍMETRO DE PROTECCIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.

CAPÍTULO VI	¡Error! Marcador no definido.
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	¡Error! Marcador no definido.
6.1. CONCLUSIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
6.2. RECOMENDACIONES.	¡Error! Marcador no definido.
BIBLIOGRAFÍA	¡Error! Marcador no definido.
WEBGRAFÍA	¡Error! Marcador no definido.
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 1: Perfiles de los depósitos cuaternarios de la investigación de 1979.	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 2: Ubicación de los pozos en concesión de COSAALT R.L. ...	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 3: Distancias de profundidad del agua subterránea.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 4: Cálculo de la permeabilidad vertical, con la extracción de espesores y su asignación de permeabilidad en función al tipo de textura.	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 5: Variación de niveles de agua de los diferentes pozos que cuentan con registros de la gestión “2019-2020” “2020-2021”.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 6: Promedio de la lluvia mensual para las diferentes gestiones	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 7: Obtención de la variación de los niveles de agua subterránea de los diferentes pozos para determinar el parámetro de la recarga.	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 9: Mapas construidos en el programa de ArcGis, también mapa encontrados en la Web.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 10: Perfiles litológicos de los pozos en concesión de COSAALT R.L.....	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1.** Mapa global de las aguas subterráneas poco profundas. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2.2.** Zonas en el subsuelo según el comportamiento de agua que se infiltra... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2.3.** Influencia de la estratigrafía y estructura en la formación de un acuífero region.. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2.4.** Distribución del agua a nivel mundial..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2.5.** a) Perfiles y movimiento del agua en suelo y subsuelo, b) Niveles piezómetros en el suelo subsuelo. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2.6.** Tipos de acuíferos según las características litológicas. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2.7.** Esquema para el cálculo del coeficiente de almacenamiento por liberación elástica...

.....;Error!

Marcador no definido.

Figura 2.8. Aparato experimental ilustrativo de la ley de Darcy. ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.9. Conceptos macroscópicos y microscópicos del flujo de agua subterránea. ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.10. Esquema conceptual para la evaluación del peligro de los recursos hídricos subterráneos ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.11. Ciclo típico de implementación de proyecto con intervención previa de una Evaluación de Impacto Ambiental ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.12. Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos..... ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.13. Clasificación de suelos por texturas según U.S.D.A.;Error! Marcador no definido.

Figura 2.14. Ejemplo de los espesores y permeabilidades . ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.15. Determinación de Isocronas (Método de Wyssling);Error! Marcador no definido.

Figura 2.16. Determinación de las isocronas por iteración. ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.17. Zonas a establecer en los perímetros de protección de la calidad para captaciones de abastecimiento urbano. ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.18. a) El agua adherida a los granos no puede ser extraída y tampoco forma parte de la sección disponible para el flujo, b) Ejemplo de porosidad eficaz por drenaje. ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.19. Variación de la porosidad con la granulometría en materiales detríticos no consolidados ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.20. Relación granulometría-porosidad eficaz..... ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.21. Ejemplo para evaluar el gradiente hidráulico. ;Error! Marcador no definido.

Figura 2.22. Desarrollo dl estándar w 101 para la delimitación de perímetros de protección en Alemania. ;Error! Marcador no definido.

- Figura 2.23.** Recomendaciones del BRGM para delimitación de perímetros de protección en Francia. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2.24.** Recomendaciones del BRGM para delimitación de perímetros de protección en Reino Unido..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2.25.** Generación del mapa de vulnerabilidad a la contaminación;**¡Error! Marcador no definido.**
de acuíferos utilizando el método GOD **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2.26.** Descripción esquemática del método DRASTIC;**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 3.1.** Identificación del área de estudio **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 4.1.** Formaciones paleozoicas de valle central de Tarija.**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 4.2.** Potenciales áreas de recarga de agua subterránea según el exceso de deuterio Tarija. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 4.3.** Distribución espacial de las edades ^{14}C del agua subterránea, como también los valores de tritio (TU). Direcciones de circulación del agua subterránea del sector norte y oeste, como también áreas de recarga preferencial del área de piedemonte – Tarija, 2018. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 4.4.** Ocurrencia de las aguas subterráneas del Área de estudio.**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 5.1.** Zonas de vulnerabilidad de aguas subterráneas "GOD".**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 5.2.** Zonas de vulnerabilidad de aguas subterráneas "DRASTIC".**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 5.3.** Zonas de vulnerabilidad de aguas subterráneas AVI.**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 5.4.** Zonas de vulnerabilidad de aguas subterráneas Ekv.**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 5.5.** Perímetros de protección a través del método Wisingl.**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 5.6. Perímetros de protección a través del método Wisingl (Google Earth). **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 5.7. Perímetros de protección método Radio fijo (en función al tiempo de tran.
..... **¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Formaciones geológicas frente al agua..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.2. Intervalos de valores de porosidad..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.3. Relación entre el tipo de materiales y su porosidad eficaz más común..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.4. Porosidades totales y eficaces de diversos materiales. Datos tomados de Johnson (1967), Davis (1969), Schoeller (1962), Muskat (1937), Meinzer (1923 b), Ward (1967), etc..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.5. Matriz de aceptabilidad de las actividades e instalaciones;**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.6. Sub índice de ponderación del factor (w) **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.7. Grados de Vulnerabilidad –Método DRASTIC. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.8. Estimaciones de conductividad hidráulica (K) para varios sedimentos en las praderas canadienses. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.9. Relación del acuífero Índice de vulnerabilidad a Resistencia Hidráulica. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.10. Índices para del grado de Vulnerabilidad –Método Ekv.**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2.11. Diagrama de vulnerabilidad - acuíferos libres –Método Ekv.**¡Error! Marcador no definido.**

- Tabla 2.12.** Descripción y valoración de variables –método EPIK. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.13.** Ponderación profundidad nivel freático (EPA , 1987). **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.14.** Ponderación recarga neta (EPA, 1987)..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.15.** Ponderación litología del suelo (EPA, 1987)... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.16.** Ponderación litología del suelo (EPA, 1987)... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.17.** Ponderación topografía (EPA, 1987)..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.18.** Ponderación litología del acuífero (EPA, 1987). **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.19.** Ponderación conductividad hidráulica (EPA, 1987). **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.20.** Función del pozo W (u) (resumida)..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.1.** Determinación de las variables. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.1.** Pozos del proyecto resultados de prueba de bombeo y de flujo. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.2.** Prueba de bombeo en pozos de CODETAR y otros organismos (Pozos no ejecutado por el proyecto)..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.3.** Resultados de la aplicación del método DRASTIC en el proyecto CABAS. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.5.** Parámetros para la aplicación del método GOD. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.6.** Precipitación media anual “Periodo 2019-2020”. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.7.** Precipitación media anual “Periodo 2020-2021”. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.8.** Variaciones del nivel freático “Periodos (2019-2020) (2020:2021)” **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.9.** Estimación de la recarga por el método VNF.... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.10.** Parámetros definidos para la aplicación del método DRASTIC. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.11.** Permeabilidades más comunes en los diferentes tipos de suelo. **¡Error! Marcador no definido.**

- Tabla 4.12.** Asignación de posibles valores de permeabilidad a los distintos tipos de suelos encontrados en los pozos de COSAALT. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.13.** Asignación de posibles valores de permeabilidad a los distintos tipos de suelos encontrados en los pozos de COSAALT. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.14.** Parámetros definidos para en método de Radio fijo.**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.15.** Parámetros definidos para la aplicación del método Wyssling. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 5.1.** Grado de índice de vulnerabilidad por el método GOD.**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 5.2.** Grado de índice de vulnerabilidad por el método DRASTIC.**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 5.3.** Grado de índice de vulnerabilidad por el método AVI.**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 5.4.** Grado de índice de vulnerabilidad por el método Ekv.**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 5.5.** Perímetros de protección determinados por el método Radio Fijo..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 5.6.** Perímetros de protección determinados por el método Wissinlg. **¡Error! Marcador no definido.**

