

**IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE HECRAS PARA MEJORAR LA ESTIMACIÓN DE PROYECTOS
EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS BRASILERAS**



Tesis para optar el título de Ingeniero Civil

AUTORA:

Carolina Del Pilar Icho Castillo

ASESORES:

Ing. José Rodolfo Scarati Martins

Ing. José Carlos de Melo Bernardino

Lima, diciembre, 2020

Resumen

El deterioro de la estructura de una represa ocurre debido a eventos naturales, extraordinarios o acciones humanas y / o biológicas, que pueden conducir, en casos más graves, a la ruptura de presas. En cuanto a las perturbaciones provocadas por caudales excepcionales, es importante estimar previamente las características de este caudal y su alcance, con el fin de elaborar planes de acción de emergencia y reducir los efectos desastrosos de un accidente de este tipo. Para predecir la propagación de la inundación después de la ruptura de una presa, se han desarrollado muchos enfoques computacionales y empíricos a lo largo de la historia. Por todo ello, este trabajo tiene como objetivo evaluar las diferentes fórmulas propuestas por investigadores de la zona para estimar el pico de caudal en la ruptura por desborde y canalización de las presas Jurumirim y Chavantes. En el estudio se utilizará el software Hec-Ras capaz de realizar una simulación física, calcular los parámetros de ruptura, simular la evolución del perfil longitudinal del río y secciones transversales, calcular los hidrogramas de los tramos de interés, etc. Pero, en este trabajo específico nos limitaremos al cálculo de los caudales máximos de ruptura. En primer lugar, se realizará un análisis en Microsoft Excel de las predicciones de parámetros de rotura de presas logradas por estudios previos para comparar los resultados obtenidos con los proporcionados por el software Hec-Ras. Luego, se implementará el software Hec-Ras para simular los resultados disponibles. Luego, los datos disponibles de las presas Chavantes y Jurumirim fueron insertados en el software Hec-Ras para simular la ruptura y así obtener información relevante sobre el fenómeno. Así, al final del estudio, los resultados obtenidos del software Hec-Ras serán comparados con los valores obtenidos de las predicciones de los parámetros de ruptura de presa logradas por estudios previos implementados en Microsoft Excel, se puede clasificar el grado de precisión de cada fórmula propuesta y recomendaremos el uso de cualquiera de ellos. De esta forma se podrían abordar futuras investigaciones relacionadas con el tema de este trabajo, como el análisis morfológico del río aguas abajo después de la ruptura, el análisis del spot de inundación en otro tipo de presas, etc.

Palabras clave: ruptura de presas, propagación de inundaciones, modelado computacional HEC-RAS, seguridad de presas, parámetros de ruptura

ABSTRACT

The deterioration of the structure of a dam happens due to natural, extraordinary events or human and / or biological actions, which can lead, in more serious cases, to the rupture of dams. Regarding the disruptions caused by exceptional flows, it is important to estimate the characteristics of this flow and its scope beforehand, in order to prepare emergency action plans and reduce the disastrous effects of an accident of this type. In order to predict the spread of the flood after the rupture of a dam, many computational and empirical approaches have been developed throughout history. For all these reasons, this work aims to evaluate the different formulas proposed by researchers in the area to estimate the peak flow in the rupture by Overtopping and Piping of the Jurumirim and Chavantes dams. In the study, the Hec-Ras software capable of making a physical simulation, calculating the rupture parameters, simulating the evolution of the longitudinal profile of the river and of the cross sections, calculating the hydrographs of the sections of interest, etc. will be used. But, in this specific work we will limit ourselves to the calculation of peak rupture flow rates. First, an analysis in Microsoft Excel will be made of the predictions of dam failure parameters achieved by previous studies in order to compare the results obtained with those provided by the Hec-Ras software. Then, the Hec-Ras software will be implemented to simulate the available results. Then, the available data from the Chavantes and Jurumirim dams were inserted in the Hec-Ras software to simulate the rupture and thus obtain relevant information about the phenomenon. Thus, at the end of the study, the results obtained from the Hec-Ras software will be compared with the values obtained from the predictions of dam rupture parameters achieved by previous studies implemented in Microsoft Excel, one can classify the degree of precision of each proposed formula and we will recommend using any of them. In such a way, future research related to the topic of this work could be approached, such as the morphological analysis of the river downstream after the rupture, the analysis of the flood spot in other types of dams, etc.

Keywords: Dam break, flood propagation, HEC-RAS computational modeling, dam safety, rupture parameters.

ÍNDICE

1. Introducción
2. Descripción de la realidad problemática
3. Formulación del problema
 - 3.1. Problema general
 - 3.2. Problemas específicos
4. Objetivos
 - 4.1. Objetivo general
 - 4.2. Objetivos específicos
5. Hipótesis
 - 5.1. Hipótesis general
 - 5.2. Hipótesis específicas
6. Justificación
7. Alcances y limitaciones
8. Aspectos y consideraciones éticas
9. Viabilidad del estudio
10. Materiales y métodos
11. Revisión bibliográfica
 - 11.1. Contexto
 - 11.2. Modelos Empíricos
 - 11.3. Modelos Matemáticos
 - 11.4. Tipos de modelos
 - 11.4.1. Modelo Cristofano
 - 11.4.2. Modelo HW
 - 11.4.3. Modelo BRDAM
 - 11.4.4. Modelo PT
 - 11.4.5. Modelo Lou
 - 11.4.6. Modelo Nogueira
 - 11.4.7. Modelos DAMBRK
 - 11.4.8. Modelo SMPDBK
 - 11.4.9. Modelo BEED
 - 11.4.10. Modelo BREACH
 - 11.4.11. Modelo HEC-RAS
 - 11.4.12. Modelo FLDWAV
 - 11.5. Tipos de fórmulas
 - 11.6. Presentación de variables
12. Resultados finales y análisis de datos
 - 12.1. Represa de Jurumirim con ruptura por Overtopping
 - 12.1.1. Caso 6
 - 12.1.2. Caso 7
 - 12.1.3. Caso 8
 - 12.1.4. Caso 9
 - 12.1.5. Caso 10
 - 12.1.6. Caso 11

- 12.1.7. Caso 12
- 12.1.8. Caso 13
- 12.1.9. Caso 14
- 12.1.10. Caso 15
- 12.1.11. Caso 16
- 12.1.12. Caso 17
- 12.1.13. Caso 18
- 12.2. Represa de Jurumirim con ruptura por Piping
 - 12.2.1. Caso 1
 - 12.2.2. Caso 2
 - 12.2.3. Caso 3
 - 12.2.4. Caso 4
 - 12.2.5. Caso 5
- 12.3. Represa de Chavantes con ruptura por Overtopping
 - 12.3.1. Caso 3
 - 12.3.2. Caso 4
 - 12.3.3. Caso 5
 - 12.3.4. Caso 6
 - 12.3.5. Caso 7
- 12.4. Represa de Chavantes con ruptura por Piping
 - 12.4.1. Caso 1
 - 12.4.2. Caso 2
- 13. Conclusiones finales y recomendaciones
- 14. Referencias bibliográficas
- 15. Anexos
 - 15.1. Plantilla de los métodos de los cuadros
 - 15.2. Plantilla de la matriz de consistencia para un estudio propiamente dicho

1. Introducción

Pueden ocurrir fallas accidentales como consecuencia del deterioro natural de la estructura, eventos naturales extraordinarios, como lluvias y tormentas extremas, terremotos, diferenciación de asentamientos, deslizamientos de rocas, tuberías, infiltraciones, desbordamientos, acción de las olas, etc. Otras causas incluyen bombardeos, sabotajes, demoliciones para el bien público, mala construcción, diseño defectuoso, operación inadecuada del reservorio, ubicación inadecuada, excavación de animales, etc. (Singh, 2013).

Los efectos de la rotura de una presa son catastróficos. Basta mencionar casos recientes en Brasil, como el accidente de las represas Brumadinho y Mariana. La ruptura de la presa produjo contaminación del río abajo, provocó la muerte de bioecosistemas marinos, infirió el terreno río abajo, enterró el bosque, provocó la destrucción de edificaciones y la muerte de trabajadores y vecinos de las inmediaciones. Pero, aunque existen muchos riesgos asociados a la construcción de represas, son de gran utilidad para la sociedad ya que producen energía, abastecen de agua, riegan la agricultura, sirven como defensa contra las inundaciones producidas por eventos hidrológicos y acumulan residuos.

Para minimizar las pérdidas asociadas con la falla de una presa, la Política Nacional de Seguridad de Represas de 2010 requiere la elaboración del Plan de Riesgo involucrado. Calcula los impactos potenciales de una interrupción e incluye un Plan de Acción de Emergencia (PAE) para proyectos de construcción. El PAE debe contener información como el mapa de la llanura aluvial y los procedimientos a realizar en casos de emergencia (Lauriano, 2009). Su ejecución se basa en la previsión y cálculo de niveles máximos de inundación, velocidades y vertidos máximos resultantes de la rotura. con el objetivo de reducir las pérdidas humanas, hidrológicas y de biodiversidad ya que es posible realizar las actividades previstas. Por otro lado, para garantizar la seguridad de las estructuras hidráulicas, la Ley de Seguridad de Represas de Brasil requiere una actualización constante del Manual de Seguridad de Represas (ANA, 2016) que describe el procedimiento de inspección de seguridad de presas.

Es por eso que está más que justificada la necesidad de desarrollar herramientas útiles para clasificar el peligro, planificar acciones de emergencia, mapear y evaluar el riesgo (Graham, 1998). Una de estas herramientas es el modelaje del efluente total de la ruptura de la presa utilizando enfoques empíricos, matemáticos y computacionales que pueden ser simplificados, hidrológicos, unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales. El modelado computacional utiliza modelos matemáticos y técnicas de computación. El uso de modelos computacionales se muestra como una herramienta importante para predecir fenómenos hidráulicos e hidrológicos.

Un modelo computacional es el software Hec-Ras, que es visto por los profesionales en la materia como un referente en este sentido. El nombre del software es un acrónimo, que traducido significa Sistema de Análisis de Río del Cuerpo de

Ingeniería del Ejército de América del Norte. Este software requiere pocos datos de entrada y presenta una vista simplificada de estudios de flujo constante unidimensionales, cálculos de flujo inestable unidimensionales y bidimensionales, cálculos de transporte de sedimentos / lecho móvil y modelado de temperatura y calidad del agua para una red completa de canales naturales. o artificial. Además, es gratuito y trabaja con pequeñas simplificaciones de la ecuación de Saint Venant, utilizando un método implícito de diferencia finita, que proporciona un alto grado de precisión y confiabilidad (Mbajjorgu, 2017).

Por lo tanto, este trabajo utilizará el software Hec-Ras y las fórmulas propuestas por los investigadores del área, para estimar el flujo máximo de la ruptura de una presa por Piping y Overtopping. Necesitará la ayuda de este software HecRas para simular la ruptura de la presa en un régimen de flujo 1-D no permanente. Los procesos de cálculo para el estudio de escenarios de emergencia darán como resultado información sobre las características del gap, tiempo de formación y caudal pico con los respectivos hidrogramas de ruptura. Además, con el análisis de caudal podremos identificar las áreas de inundación y la hora de llegada de la ola de crecida en puntos de interés ubicados aguas abajo de la presa.

Así, este proyecto tiene como objetivo, principalmente, identificar y predecir el alcance de algunos de los efectos de la rotura de las presas Jurumirim y Chavantes a través de un modelado computacional confiable, que en este caso será el software Hec-Ras. Para lograr el objetivo, se propone revisar la literatura sobre el tema, organizar los datos recopilados a partir del relevamiento de campo, realizar un análisis en Microsoft Excel de las predicciones de los parámetros de ruptura de una presa y comparar los parámetros de ruptura proporcionados por el software. Hojas de cálculo Hec-Ras y Microsoft Excel programadas con las fórmulas propuestas por investigadores en el campo. Y así, evaluar la precisión de cada uno de ellos en diferentes condiciones y clasificar los más confiable según una escala. Sin duda un buen aporte a los ingenieros profesionales que necesitan realizar estos cálculos.

2. Descripción de la realidad problemática

En el mundo entero es necesario realizar una estimación de proyectos hidráulicos rápido y eficiente para realizar presupuestos de material e inversión.

En América latina existen diversas herramientas de modelaje computacional del tipo matemático y empírico que serán detalladas más adelante y pueden ser utilizadas para calcular la eficiencia de las fórmulas propuestas por diferentes autores.

En Brasil se utiliza más frecuentemente el software HecRas pues exige pocos datos de entrada y presenta una vista simplificada de estudios de flujo constante unidimensionales, cálculos de flujo inestable unidimensionales y bidimensionales, cálculos de transporte de sedimentos / lecho móvil y modelado de temperatura y calidad del agua para una red completa de canales naturales o artificiales.

En el Rio Paranapanema ubicado en el estado de São Paulo la estimación de ruptura de las rerepresas de las centrales hidroeléctricas Chavantes y Jurumirim es impreciso.

Esto debido a la dificultad en estudiar la gran cantidad de variables de las cuales dependen el mapa de inundación y parámetros de ruptura.

De esta manera, si este problema detectado no es solucionado ocurrirá el retraso del proyecto y realización de cálculos imprecisos siendo un peligro para sociedad tanto en el ámbito de seguridad, biodiversidad y económico.

El aporte de este trabajo es recomendar los métodos más precisos para estimar el caudal pico efluente.

3. Formulación del problema

3.1. Problema general

- ¿La implementación del software HecRas mejorará la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas?

3.2. Problemas específicos

- ¿Cómo es la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras antes de la implementación del software HecRas?
- ¿La implementación del software HecRas mejorará la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la primera etapa de colocación de datos de entrada?
- ¿La implementación del software HecRas mejorará la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la segunda etapa de realización de simulaciones?
- ¿Cómo es la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras después de la implementación del software HecRas?

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

- Implementar el software HecRas para identificar las fórmulas más precisas propuestas por los autores

4.2. Objetivos específicos

- Describir la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas antes de la implementación del software HecRas
- Implementar el software HecRas para mejorar la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la primera etapa de colocación de datos de entrada
- Implementar el software HecRas para mejorar la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la segunda etapa de realización de simulaciones
- Describir la estimación de proyectos en centrales

hidroeléctricas después de la implementación del software HecRas

5. Hipótesis

5.1. Hipótesis genera

- La implementación del software HecRas permitirá identificar las fórmulas más precisas propuestas por los autores.

5.2. Hipótesis específicas

- La implementación del software HecRas mejorará la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la primera etapa de colocación de datos de entrada
- La implementación del software HecRas mejorará la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la segunda etapa de realización de simulaciones.

6. Justificación

La importancia general del desarrollo de esta investigación es tener contacto con el método científico y poder desarrollar el pensamiento crítico, adquirir mayor experiencia como investigadores y juzgar los trabajos publicados por otros autores. De esta forma, poder ser más autodidacta y obtener una mayor seguridad en el desempeño de la vida profesional.

En concreto, el trabajo resume importantes propuestas que tienen como objetivo predecir características de posibles brechas que ocurren en la ruptura de una represa a partir de una revisión histórica de las mismas y aplicando conceptos matemáticos, computacionales y empíricos para parametrizarlas y lograr un estándar que pueda modelar las rupturas futuras. Una de estas características es la estimación de los caudales de efluentes de la brecha de ruptura, de la cual se puede obtener información sumamente importante y necesaria para garantizar la seguridad de las represas, la cual pasó a ser obligatoria desde el establecimiento de la Política Nacional de Seguridad de Represas en 2010 que consiste en la elaboración del Plan de Riesgo involucrado donde se consideran los Impactos Potenciales de una ruptura. La elaboración de un Plan de Acción de Emergencia (PAE) y la determinación de las áreas afectadas con el objetivo de reducir las pérdidas humanas, hidrológicas y de biodiversidad tal como se encuentra. realizar las actividades previstas.

La Ley de Seguridad de Represas de Brasil requiere una actualización constante del Manual de Seguridad de Represas (ANA; Brasil, 2016). Donde se describe el procedimiento de inspección de seguridad de la represa, que comienza con la clasificación por categoría de riesgo, por posibles daños asociados al volumen en base a los siguientes criterios:

Critério de Classificação	Informações Necessárias
Dano Potencial Associado	Ocupação do vale a jusante
	Modelo Digital de Terreno
	Volume do Reservatório
	Altura da barragem
	Características da primeira barragem de jusante
Categoria de Risco	Características Técnicas
	Estado de conservação do empreendimento
	Atendimento ao Plano de Segurança de Barragem

Tabla 1: Información necesaria para clasificar una represa

Fuente: ANA

Los trabajos de inspección pueden ser de carácter regular y excepcional. La acción regular implica el conjunto de actividades de inspección que se planifican durante un período determinado, incluido el análisis de documentos y las encuestas. Por otro lado, el carácter excepcional se da por denuncias y, en el caso de Seguridad de Represas, también tras la ocurrencia de eventos extremos que podrían poner en riesgo la represa y las poblaciones ubicadas río abajo. En tales casos, se suele realizar una encuesta específica.

Después de la aceptación del plan de seguridad de la represa, la sociedad debe ser concientizada poniendo a su disposición el informe anual de Seguridad de la Represa, preparando materiales didácticos y promoviendo asociaciones con instituciones educativas relacionadas con la ingeniería de represas y áreas relacionadas.

Si la represa no cumple con los requisitos de seguridad de la legislación pertinente, debe recuperarse o desactivarse.

Sin embargo, la Ley N ° 12.334 / 2010 no definió las infracciones ni fijó las sanciones. En el caso de ANA, debido a este vacío legal, se decidió en el ámbito del PNSB enmarcar las infracciones y aplicar las sanciones previstas en la Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Así, los instrumentos de la actividad fiscalizadora deben definirse en el momento en que la legislación específica que se ocupa del art. 22 del PNSB.

En el Perú, la Primera Evaluación de Seguridad se lleva a cabo antes de que el equipo técnico especializado llene el depósito. Posteriormente, la evaluación de seguridad de la represa la realiza el equipo técnico del Titular cada 6 meses y por un período de cinco años. Luego, se programan inspecciones periódicas o detalladas. No obstante, para los casos de presas preexistentes la publicación de este reglamento, esta primera evacuación de seguridad se realiza en un plazo máximo de 4 meses. En el cual informe de evaluación de seguridad de represas detallando las condiciones actuales y seguridad de la represa, además de las acciones recomendadas para su implementación. Por lo tanto, se emite un documento que enumera los defectos o insuficiencias detectadas y las acciones a implementar para mantener la seguridad de la represa en niveles adecuados, siendo

presentado a ANA.

Las inspecciones periódicas son anuales y deben informar a la ANA después de la inspección donde se evalúen las anomalías o defectos de la represa; identificar las posibles causas en comparación con la inspección anterior; y proponer soluciones y proporcionar los recursos necesarios para repararlas. Además, debe evaluar el nivel de peligrosidad de la represa, clasificándola en estado normal, de atención, alerta o emergencia. Las inspecciones detalladas analizan como mínimo las condiciones de operación, caudales previstos, capacidad de los órganos de descarga, nivel máximo del embalse, sus requerimientos, erosiones, sedimentación, estado de los equipos, efectividad de los drenajes, sistemas de comunicación y suministro de energía.

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) podrá promover las acciones civiles y penales, según corresponda, a los responsables de cualquier accidente en la represa o incumplimiento de lo dispuesto en este reglamento. (ANA; Perú, 2019)

En los Estados Unidos, la legislación sobre seguridad de las represas es independiente y variada en cada estado. Algunos de ellos requieren una sanción en dinero y / o trámite legal en caso de incumplimiento de las leyes establecidas. (Asociación de Funcionarios de Seguridad de Represas Estatales, 2000)

7. Materiales y métodos

Primero se realizó una revisión bibliográfica de los textos recomendados por los asesores. Se realizaron lecturas de los libros y artículos de los autores más relevantes sobre este tema. Luego, en ellos se encontraron referencias de otros autores con aportes importantes. Entonces, si buscaban en sus publicaciones, obteniendo una amplia lista de herramientas de cálculo, existía la necesidad de limitar la búsqueda a las publicaciones más recientes.

En segundo lugar, se realizaron resúmenes de los textos leídos y la implementación de hojas de cálculo de las fórmulas investigadas con sus respectivos autores, pie de foto y parámetros, todo de manera organizada de acuerdo al número de variables que se necesitan para el cálculo.

En tercer lugar, se han reemplazado los datos sobre las hipotéticas rupturas de algunas presas en el río Paranapanema (FCTH; Duke-Energy, 2003) en las hojas de cálculo. Los resultados obtenidos también se representarán en gráficos. También es importante mostrar sus indicadores estadísticos para visualizar la efectividad y precisión de cada uno.

Finalmente, está previsto realizar simulaciones en una herramienta computacional, en este caso utilizaremos HEC-RAS. La realización del modelo tendrá 2 etapas: Colocación de datos de entrada y realización de simulaciones.

8. Revisión bibliográfica

8.1. Contexto

Se reportaram diversos casos de ruptura no longo da história, o Singh recopilou alguns que serão mostrados nas tabelas seguintes com suas características física e informação das suas brechas produzidas (Singh e Scarlatos, 1988)

Number (1)	Name and Country of Dam (2)	Year Built/ Failed (3)	Height (m) (4)	Crest Width (m) (5)	Dam Slopes Vertical: Horizontal	Storage (m ³) (7)	Peak Outflow Discharge (m ³ /s) (8)	Breach Width	Average Breach Depth (m) (10)	Time of Failure (hrs) (11)
					Upstream/ Downstream (6)			Top/Bottom/ Average (9)		
1	Apishapa, U.S.A.	1920/1933	34	4.9	1:3/1:2	2.25 × 10 ⁷	6.85 × 10 ³	91.5/ 81.5/86.5	30.5	2.5
2	Baldwin Hills, U.S.A.	1951/1963	49	19	1:2/1:1.8	1.10 × 10 ⁸	1.1 × 10 ⁴	23/ 10/16.5	27.5	1.3
3	Bradfield, England	1863/1864	29	--	--	3.20 × 10 ⁶	1.15 × 10 ³	--/ --/--	--	<0.5
4	Break Neck Run, U.S.A.	1877/1902	7	--	--	4.5 × 10 ⁶	9.2	--/ --/30.5	7	3
5	Buffalo Creek, U.S.A.	1972/1972	14	128	1:1.6/1:1.3	6.10 × 10 ⁴	1.42 × 10 ⁴	153/ 97/125	14	0.5
6	Bullock Drew Dike, U.S.A.	1971/1971	5.8	4.3	1:2/1:3	1.13 × 10 ⁶	--	12.6/ 11.0/12.3	5.8	--
7	Canyon Lake, U.S.A.	1938/1972	6	--	--	9.85 × 10 ⁶	--	--/ --/--	--	0.10
8	Cheaha Creek, U.S.A.	1970/1970	7	4.3	1:3/1:2.5	6.9 × 10 ⁶	--	--/ --/--	--	5.5
9	Coedy, England	1924/1925	11	--	--	3.1 × 10 ⁶	--	47/ 18.2/42.5	--	--
10	Eglaou, England	1908/1925	10.5	--	--	4.52 × 10 ⁶	4.0 × 10 ⁴	--/ --/--	--	--
11	Elk City, U.S.A.	1925/1936	9	--	1:3/1:2	7.4 × 10 ⁶	--	45.5/ --/--	9	--
12	Erindale, Canada	1910/1912	10.5	--	--	--	--	39.5/ --/--	4.6	<0.5
13	Euclydes de Cunha, Brazil	1958/1977	53	--	--	1.36 × 10 ⁷	1.02 × 10 ⁴	131/ --/--	53	7.3
14	Frankfurt Germany	1975/1977	10	--	--	3.5 × 10 ⁶	7.9 × 10 ³	9.2/ 4.6/6.9	10.0	2.5
15	French Landing, U.S.A.	1925/1925	12	2.5	1:2/1:2.5	--	9.3 × 10 ⁴	41/ --/--	14.2	0.58
16	Frenchman Creek, U.S.A.	1952/1952	12.5	6	1:3/1:2	2.10 × 10 ⁷	1.41 × 10 ³	67/ 54.4/60.4	12.5	--
17	Frias, Argentina	1940/1970	--	--	1:1/1:1	--	--	82/ --/--	15	0.25
18	Goose Creek, U.S.A.	1903/1916	6	3	1:1.5/1:1.5	1.06 × 10 ⁷	5.65 × 10 ³	30.5/ 22.3/26.4	4.1	0.5
19	Grand Rapide, U.S.A.	1874/1900	7.5	3.7	1:1.5/1:1.5	2.2 × 10 ⁶	--	12.2/ 6.0/9.1	7.5	<0.5
20	Hacchtown, U.S.A.	1908/1914	19	6	1:2/1:2.5	1.48 × 10 ⁷	2.1 × 10 ³	180/140.4/160.2	19.0	3
21	Hacfield, U.S.A.	1908/1911	6.8	--	--	1.23 × 10 ⁷	3.4 × 10 ³	--/ --/91.5	6.8	2
22	Hebron, U.S.A.	1913/1914	11.5	3.7	1:3/1:1.5	--	--	61/ 30.4/45.7	15.3	2.25
23	Johnston City, U.S.A.	1921/1981	4.3	1.8	1:4.75/1:2.75	5.75 × 10 ⁶	--	13.4/ 2/7.7	5.2	--
24	Kaddan, India	1957/1958	12.5	--	--	2.14 × 10 ⁶	--	30/ --/--	15.2	1
25	Kelly Barnes, U.S.A.	1948/1977	11.5	6	1:1/1:1	5.05 × 10 ⁶	6.8 × 10 ³	35/ 18/26.5	11.5	0.5
26	Lake Avalon, U.S.A.	1894/1904	14.5	--	--	7.75 × 10 ⁶	2.32 × 10 ³	--/ --/137	14.5	2
27	Lake Barcroft, U.S.A.	1933/1972	21	--	--	3.12 × 10 ⁶	--	23/ --/--	11	>1
28	Lake Frances, U.S.A.	1899/1899	15	5	1:3/1:2	8.65 × 10 ⁶	--	30/ 10.4/20.2	15	1
29	Lake Latonka, U.S.A.	1965/1966	13	--	--	1.59 × 10 ⁶	2.5 × 10 ³	--/ --/33.5	13	3

Tabla 2: Historia de ruptura de represas con sus características. **Fuente:** Singh y Scarlatos (1988)

Number (1)	Name and Country of Dam (2)	Year Built/ Failed (3)	Height (m) (4)	Crest Width (m) (5)	Dam Slopes Vertical: Horizontal	Storage (m ³) (7)	Peak Outflow Discharge (m ³ /s) (8)	Breach Width	Average Breach Depth (m) (10)	Time of Failure (hrs) (11)
					Upstream/ Downstream (6)			Top/Bottom/ Average (9)		
30	Laurel Run, U.S.A.	----/1977	13	--	--	3.85×10^8	1.05×10^3	--/ --/--	--	--
31	Little Deer Creek, U.S.A.	1962/1963	26	--	--	1.73×10^8	1.33×10^3	23/ --/--	21.4	0.33
32	Lower Two Medicine, U.S.A.	1913/1964	11	--	--	1.96×10^7	1.8×10^3	--/ --/--	--	--
33	Lyman, U.S.A.	1913/1915	20	3.7	1:2/1:2	4.95×10^7	--	107/ 87/97	20	--
34	Mammoth, U.S.A.	1916/1917	21.3	--	--	1.36×10^8	2.52×10^3	--/ --/9.2	21.3	3
35	Manchhu II, India	----/1979	60	6	1:3/1:2	1.10×10^8	--	540/ --/--	60	2.0
36	Melville, U.S.A.	1907/1909	11	3	1:3/1:1.5	--	--	40/ --/--	11	--
37	Nanaksagar, India	1962/1967	16	--	--	2.1×10^8	9.7×10^3	--/ --/46	16	12
38	North Branch, U.S.A.	----/1977	--	--	--	--	2.9×10^3	--/ --/--	--	--
39	Oakford Park, U.S.A.	----/1903	6	2.6	--	--	--	23/ --/--	4.6	1
40	Oros, Brazil	1960/1960	35.5	--	--	6.5×10^8	1.15×10^4	200/ --/--	35.5	--
41	Otto Run, U.S.A.	----/1977	--	--	--	--	6.0×10^3	--/ --/--	--	--
42	Rito Manzanares, U.S.A.	----/1975	7.3	3.7	1:1.34/1:1.34	2.46×10^8	--	19/ --/--	7.3	--
43	Salles Oliveira, Brazil	1966/1977	35	--	--	2.59×10^8	7.2×10^3	--/ --/168	35	2
44	Sandy Run, U.S.A.	----/1977	8.5	--	--	5.68×10^8	4.35×10^3	--/ --/--	--	--
45	Schaeffer, U.S.A.	----/1921	30.5	4.6	1:3/1:2	3.92×10^8	4.5×10^3	210/ --/--	27.5	0.5
46	Sheep Creek, U.S.A.	1969/1970	17	6	1:3/1:2	1.43×10^8	--	30.5/ 13.5/22	17	--
47	Sherburne, U.S.A.	1892/1905	10.5	--	--	4.2×10^8	9.6×10^3	46/ --/--	--	--
48	Sinker Creek, U.S.A.	1910/1943	21	--	--	3.33×10^8	--	92/ 49.2/70.6	21.0	2
49	South Fork, U.S.A.	----/1977	--	--	--	--	1.22×10^3	--/ --/--	--	--
50	Spring Lake, U.S.A.	1887/1889	5.5	2.5	1:0.75/1:0.75	1.35×10^8	--	20/ 9/14.5	5.5	--
51	Teton, U.S.A.	1972/1976	93	10.5	1:3/1:2.5	3.56×10^8	6.6×10^3	--/ --/46	79	4
52	Wheatland Number 1, U.S.A.	1893/1969	13.6	6	--	1.15×10^7	--	46/ 41/43.5	13.5	1.5

Tabla 3: Segunda parte del Histórico de las rupturas de represas con sus características. **Fuente:** Singh e Scarlatos (1988)

Es posible observar la gran cantidad de accidentes que tuvieron impactos fatales en el ecosistema, la construcción, la economía y la humanidad. Por ello, es fundamental realizar un estudio minucioso de ruptura de represas para evitar situaciones de riesgo o accidentes catastróficos. Para satisfacer esta necesidad, se desarrollaron herramientas de modelado matemático y empírico.

8.2. Modelos Empíricos

Se proponen soluciones analíticas dimensionales de modelos empíricos en los casos en que se presente un gap rectangular con erosión lineal y no lineal, un gap triangular con erosión lineal y no lineal, un gap trapezoidal y se analizó el comportamiento del agotamiento del agua almacenada en el embalse. después de que termina la erosión (SINGH, 2013)

8.3. Modelos Matemáticos

Existen diversos modelos de simulação para ruptura de barragens disponíveis mundialmente, na seguinte tabela serão mencionados

os modelos mais conhecidos com a sua respectiva organização de suporte (LAURIANO, 2009). Elas se mostrarão classificadas segundo as suas características dimensionais e posteriormente serão detalhados alguns modelos que não necessariamente aparecerão na tabela

	Modelo	Organização / Suporte
1D	HEC-RAS	USACE
	MIKE 11	DHI
	DAMBRK	NWS
	SMPDBK	NWS
	FLDWAV	NWS
	Hydro 1D	Mott MacDonald
	InfoWorks RS	Wallingford Software
	ISIS	Wallingford Software
	BOSS DAMBRK	Boss International
	SOBEK	WL/Delft Hydraulics
	DBK 1	IWHR, China
	Civ PLUS	EPUSP
	HAESTED DAMBRK	HAESTED METHODS
	LATIS	Tams
	TVDDAM	Royal Institute of Technology
	RUBAR 3	Cemagref
	CASTOR	Cemagref
	SOBEK	Delft Hydraulics
	DYNET - ANUFLOOD	ANU - Reiter Ltd
	RECAS	ENEL Centro di Ricerca Idraulica
STREAM	ENEL Centro di Ricerca Idraulica	
FLORIS	ETHZ	
RUPTURE	EDF - Laboratoire National Hydraulique	
DAMBRK-UK	Binnie & Partners	
2D	MIKE 21	DHI
	JFLOW	Jeremy Benn Associates
	Hydro 2D	Mott MacDonald
	DIVAST	Cardiff University
	DelBFLS	Delft Hydraulics
	SMS	USACE, EMRL e FHWA
	DBK 2	IWHR, China
	FLOOD 2D	ENEL Centro di Ricerca Idraulica
	2D-MB	ETHZ
	RUBAR 2D	Cemagref
	DYX 10	Consulting Engineers Reiter Ltd
TELEMAC-2D	EDF - Laboratoire National Hydraulique	
3D	MIKE 3	DHI
	Hydro 3D	Mott MacDonald
	Delft 3D	Delft Hydraulics
	FLUENT	FLUENT
	TRIVAST	Cardiff University
TELEMAC-3D	EDF - Laboratoire National Hydraulique	

Tabla 4: Modelos implementados computacionalmente con sus respectivas Organizaciones que los crearon. **Fuente:** Lauriano (2009)

11.4. Tipos de modelos

11.4.1. Modelo Cristofano

Fue propuesto por Cristofano en 1965 y necesita datos de entrada como cohesión del suelo, ángulo de fricción, medida de compactación bajo presión intragranular y elevación del embalse.

11.4.2. Modelo HW

Fue propuesto por Harris y Wagner (1967) y sus condiciones iniciales son la elevación inicial de la superficie del agua, el tamaño inicial de la brecha y la inclinación inicial de la brecha. Se necesitan datos de entrada como la relación entre la capacidad del embalse vs. profundidad, el tipo de material utilizado en el relleno sanitario, la geometría del relleno sanitario, la ubicación de la base de la roca, la elevación inicial de la superficie del agua y la elevación de la cresta

11.4.3. Modelo BRDAM

Propuesto por Brown y Rogers (1997). Este modelo tiene como condiciones iniciales la información del embalse al inicio de la ruptura, el agua de cola y la elevación de la cresta. Es fundamental contar con los siguientes datos, ya que son datos de entrada del modelo, geometría de la presa, propiedades del suelo, hidrograma de entrada al embalse, elevación máxima y mínima de la superficie del agua, almacenamiento del embalse vs. la curva de elevación, drenaje de agua de cola máxima y mínima, elevación de agua de cola vs. caudal en el canal aguas abajo, agua de entrada para cada aliviadero, información sobre la toma de agua y obras de la planta, almacenamiento de inundaciones y liberación de datos.

11.4.4. Modelo PT

Propuesto por Ponce y Tsivoglou (1981). Las condiciones iniciales y los datos de entrada para la operación del modelo son área inicial, ancho, profundidad y velocidad de flujo, información de la presa y geometría de la brecha, características del suelo, coeficientes de rugosidad y resoluciones espaciales y temporales.

11.4.5. Modelo Lou

Fue propuesto por Lou (1981). Se basa en el análisis del esfuerzo cortante y el mecanismo de erosión y se deriva de una expresión analítica. Sus datos de entrada deben tener información sobre el volumen del depósito vs. elevación de la superficie del agua, entrada por cada obra de aliviadero y desagüe, propiedades del material de relleno, factores de rugosidad, curva de clasificación en el tramo más aguas abajo, tiempo de ruptura, índice de erosión y resoluciones espaciales y temporales.

11.4.6. Modelo Nogueira

Nogueira (1984) estudia 6 casos y concluyó un modelo con datos de entrada como el hidrograma de entrada, gráfica del volumen del yacimiento vs. elevación de la superficie del agua, vertido, erosión en la sección inicial, curva de descarga de la etapa en la sección inicial, factores de rugosidad, propiedades del suelo y resoluciones espaciales y temporales.

11.4.7. Modelos DAMBRK

Propuesto por Fread (1984 a, b). Predice en tiempo real una crecida natural y considera la profundidad del flujo y la descarga de todas las secciones transversales al inicio como condiciones iniciales. Las condiciones de contorno se definen como el hidrograma del flujo de efluentes del embalse y la relación del estado de descarga aguas abajo. Las categorías precedentes son el tiempo de ruptura, ancho final de la base de la brecha, pendiente lateral de la brecha, elevación final de la base de la brecha, nivel de agua inicial en el depósito, elevación del agua cuando comienza a formarse la brecha, elevación del agua cuando comienza a formarse la brecha, elevación de la cima de la represa, entrada a cada aliviadero, obras de drenaje, estación de fuerza, gráfico de capacidad del embalse vs. elevación de la superficie del agua. Y las últimas categorías son las secciones transversales del canal aguas abajo, el coeficiente de resistencia y los coeficientes de expansión y contracción. Sin embargo, tiene limitaciones como confinar el análisis de caudal mediante un simple curso de agua, fijar los órdenes del programa informático y limitar la longitud del tramo de río que se puede simular.

11.4.8. Modelo SMPDBK

Es un modelo simplificado propuesto por Wetmore y Fread (1984) cuyos datos de entrada son la elevación de la cresta de la presa, elevación final de la base de la brecha, volumen almacenado en el embalse, superficie del embalse, ancho final de la brecha, tiempo requerido para la formación de la brecha, desbordamiento de flujo, flujo por las turbinas, información de los aliviaderos, otras obras de construcción al momento de la ruptura.

11.4.9. Modelo BEED

Singh y Scarlatos (1986, 1987 a) probaron la erosión de la brecha en las presas de terraplenes analizando el mecanismo de colapso de la pendiente en condiciones de suelo saturado. Los datos de entrada para el modelo son las características geométricas y físicas de la presa, información del embalse y el canal aguas abajo (dimensiones de la presa).

11.4.10. Modelo BREACH

Propuesto por Fread (1984b) después de probarlos en 3 presas de terraplén. Considera como datos de entrada las propiedades del material de relleno de la presa, cohesión, tamaño de grano, unidad de peso, geometría de la presa, gráfico de flujo versus curvas de elevación para cada aliviadero y tomas de agua, capacidad del reservorio vs. nivel de la superficie del agua, nivel de la superficie del agua al inicio de la formación del espacio, hidrograma afluente, factores de rugosidad, geometría del espacio de ruptura, canal de

erosión de la relación entre profundidad y ancho en el caso de desborde.

11.4.11. Modelo HEC-RAS

Es el método más utilizado porque está disponible de forma gratuita. Fue diseñado para flujos permanentes y no permanentes, y para regímenes subcríticos y supercríticos. Para su desarrollo se utilizaron métodos implícitos de diferencias finitas, como la ecuación de Saint Venant, y la técnica de inercia local parcial (LPI), que se explicará más adelante. Sus datos de entrada son las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo, secciones transversales a lo largo del agua, información sobre estructuras hidráulicas y el coeficiente de rugosidad de las secciones. Como todo modelo, tiene algunas limitaciones, podemos mencionar que las ecuaciones que gobiernan el modelo son unidimensionales pero no se pueden utilizar en todo el caudal porque existen tramos bidimensionales, incertidumbres en el volumen de agua en el embalse ya que es difícil cuantificar la pérdida por infiltración, evaporación y otros factores, obstrucción de las secciones transversales ya que los escombros interfieren con la geometría después de una inundación por ruptura de una presa, otro efecto del transporte de escombros es la incertidumbre del valor adoptado como el número de dotación, las altas velocidades de la onda de ruptura producen erosión en el cauce del río y dificultan la estimación de la geometría y rugosidad. Las condiciones de contorno son la serie de tiempo del nivel del agua y las elevaciones del flujo, la curva de flujo permanente clave y la curva clave obtenida con la ecuación de Manning.

11.4.12. Modelo FLDWAV

Es otro modelo popular y gratuito. Fue diseñado solo para flujo no permanente y usa el método de diferencias finitas usando el esquema implícito de 4 puntos y resuelve las ecuaciones de Saint Venant. Los datos de entrada son las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo, las secciones transversales a lo largo del curso de agua, información sobre las estructuras hidráulicas y el coeficiente de rugosidad de las secciones. Las condiciones de frontera aguas abajo son la curva de flujo permanente clave, el bucle clave con bucle o dinámica, la curva de flujo permanente clave usando la ecuación de Manning, la curva de flujo crítico clave que ocurre en una cascada o al comienzo de una pequeña corriente, la serie de tiempo de aumentos en el nivel y los flujos del agua. Los datos de salida del modelo son los valores de profundidad y caudal. Sus limitaciones son las mismas que las del modelo HEC-RAS.

11.5. Tipos de fórmulas

A continuación, las fórmulas implementadas en los modelos se clasificarán de acuerdo con la cantidad de variables que necesitan para calcular las magnitudes de salida, tales como flujo máximo, tiempo de formación de la brecha, ancho promedio de la brecha, volumen erosionado de la presa, sección transversal húmeda de la brecha, velocidad de erosión a través de la brecha y cresta, evolución de la altura y ancho de la brecha, velocidad de agotamiento del agua en el embalse y otros.

Formulas that depend on 1 variable		
Vazão de pico	Pierce (2008) - Linear	$Q_p = 0.784(H)^{2.668}$
	Pierce (2008) - Curvilinear	$Q_p = 2.325 \ln(H)^{6.405}$
	Pierce (2008)	$Q_p = 0.00919(V)^{0.745}$
	Singh and Snorrason (1984)	$Q_p = 1.776(S)^{0.47}$
	Bureau of reclamation (1982)	$Q = 19.1(h_w)^{1.85}$ (envelope equation)
	SCS (1981)	$Q = 16.6h_w^{1.85}$
	Singh and Snorrason (1984)	$Q = 13.4(h_d)^{1.89}$ $Q = 1.776(S)^{0.47}$
	Costa (1985)	$Q = 1.122(S)^{0.57}$
	Evans (1986)	$Q = 0.72V_w^{0.53}$
	Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	$Q_p = 7,683H_d^{1.909}$
	NRCS apud (Earth dams)	$Q_{max} = (65)H_w^{1.85}$ $Q_{max} = (1,100)B_r^{1.35}$
Tempo de formação da brecha	Von Thun and Gillette (1990)	$t_f = 0.02 h_w + 0.25$
	Von Thun and Gillette (1990)	$t_f = 0.015 h_w$
	MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	$t_f = 0.0179 (V_{moded})^{0.364}$

Tabla 5: Fórmulas para calcular las características de la brecha que dependen solo de 1 variable. **Fuente:** Autor

Formulas that depend on 2 variables		
Peak flow	Froehlich (1995b)	$Q=0.607V_w^{0.295}h_w^{1.24}$
	MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	$Q=1.154(V_w h_w)^{0.412}$ $Q=3.85(V_w h_w)^{0.411}$ (envelope equation)
	Hagen (1982)	$Q=0.54(S h_d)^{0.5}$
	Hagen (1982)	$Q_p = 1,205(H_d V)^{0.48}$
	Saint Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (1997)	$Q_p = \frac{8}{27} B_d \sqrt{g Y_{medio}^3}$
	Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	$Q_p = 1,7 B_b H_b^{3/2}$
	Costa (1985)	$Q=0.981(S h_d)^{0.42}$ $Q=2.634(S h_d)^{0.44}$ (envelope equation)
Tempo de formação da brecha	Froehlich (1995a) - hrs	$t_f = 0.00254 V_w^{0.55} h_b^{-0.50}$
	Froehlich (2008) -seconds	$t_f = 63.2 \sqrt{\frac{V_w}{g h_b^2}}$
	Von Thun and Gillette (1990) - hrs	$t_f = \frac{B_{ave}}{4 h_w}$
	Von Thun and Gillette (1990) - hrs	$t_f = \frac{B_{ave}}{4 h_w + 61.0}$
Volumem erodido	-MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) - m3 - For earthfill dams	$V_{eroded} = 0.0261 (V_{out} * h_w)^{0.769}$
	MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) - m3 - For earthfill with clay core or rockfill dams	$V_{eroded} = 0.00348 (V_{out} * h_w)^{0.852}$
Average breach width (m)	Von Thun and Gillette (1990)	$B_{ave} = 2.5 h_w + C_b$

Tabla 6: Fórmulas para calcular las características de la brecha que dependen solo de 2 variables. **Fuente:** Autor

Formulas that depend on 3 variables		
Discharge	Mohamed e.t. - downstream	$Q_b = 3 B_o (H - H_c)^{1.5}$
	Mohamed.e.t. - pipe	$Q_b = 0.98 A \sqrt{2g(H - H_p)}$
	Macchione - Trapezoidal breach	$Q = \left(\frac{1}{2}g\right)^{1/2} \left[\frac{4}{5}(Z - Y)\right]^{5/2} \tan \beta$
	Macchione - Triangular breach	$Q = \left(\frac{1}{2}g\right)^{1/2} [h_c(h_c - 2Y)]^{3/2} (h_c - Y)^{-1/2} \tan \beta$
Area of the breach	Singh	$A_b = b(H - Z)$; rectangular breach.
		$A_b = s(H - Z)^2$; triangular breach.
	Macchione - Triangular	$A_b = (Z_M - Y)^2 \tan \beta$
Macchione - Trapezoidal	$A_b = (Z_M - 2Y)Z_M \tan \beta$	
Average breach width (m)	Froehlich (1995a)	$B_{ave} = 0.1803 K_o V_w^{0.32} h_b^{0.19}$
	Froehlich (2008)	$B_{ave} = 0.27 K_o V_w^{0.32} h_b^{0.04}$

Tabla 7: Fórmulas para calcular las características de la brecha que dependen solo de 3 variables. **Fuente:** Autor

Formulas that depend on 4 variables		
Water volume flow	Singh	$\frac{dV}{dt} = I_0 - Q_b - Q_s - Q_{sp}$
Wet breach cross section	Singh - Trapezoidal breach	$A_b = b(H - Z) + s(H - Z)^2$
Erosion rate	Singh	$A_s \frac{dH}{dt} = \alpha_1(H - Z)^{1/2} A_b$
Rate of triangular breach erosion (Nonlinear erosion)	Singh	$\ln \frac{1 + A_5^{1/3} h^{1/2} + A_5^{2/3} h}{(1 - A_5^{1/3} h^{1/2})^2} - 2 \cdot 3^{1/2} \tan^{-1} \frac{2A_5^{1/3} h^{1/2} + 1}{3^{1/2}}$ $= 3A_5^{2/3} (Z_0 - Z) + \ln \frac{1 + A_5^{1/3} h_0^{1/2} + A_5^{2/3} h_0}{(1 - A_5^{1/3} h_0^{1/2})^2} -$ $- 2 \cdot 3^{1/2} \tan^{-1} \frac{2A_5^{1/3} h_0^{1/2} + 1}{3^{1/2}}$
Depletion of reservoir water after termination of erosion	Singh	$H = \frac{4}{\left[\alpha_1 \frac{b}{A_s} + \frac{2}{(B_0^0)^{1/3}} \right]^2}$
Largura da base da brecha (trapezoidal)	Apud Duke-Energy International-Brasil/Geraç3o Paranapanema (FCTH)	$b(t) = B \left(\frac{t}{T} \right)^2, \text{ se } t \leq T$ $b(t) = B, \text{ se } t > T$
Altura da brecha (trapezoidal)	Apud Duke-Energy International-Brasil/Geraç3o Paranapanema (FCTH)	$h(t) = h \left(\frac{t}{T} \right)^2, \text{ se } t \leq T$ $h(t) = H, \text{ se } t > T$
Peak flow	Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	$Q_p = 1.7B_b \left\{ \frac{1.94 \frac{A_s}{B_b}}{T_p + \left[\frac{1.94 A_s}{(B_b \sqrt{H_d})} \right]} \right\}^3$

Tabla 8: Fórmulas para calcular las características de la brecha que dependen solo de 4 variables. **Fuente:** Autor

Formulas that depend on 5 variables		
Rate of depletion of water elevation	Singh	$A_s(H) \frac{dH}{dt} = I_0 - Q_b - Q_s - Q_{sp}$
Bottom width of the breach (m)	MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	$W_b = \frac{V_{erosion} - h_b^2 (CZ_0 + h_b Z_3 / 3)}{h_b (C + h_b Z_3 / 2)}$
Flow	Xu and Zhang (2009) - Peak Flow	$\frac{Q_p}{\sqrt{g} V_w^{2/3}} = 0.175 \left(\frac{H_d}{H_r} \right)^{0.199} \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{-1.274} e^{\beta_4}$
	Singh(1988) - Over the crest	$Q_o = C_1^*(B_b - B)(H - Z_0)^{3/2}$
	Singh(1988) - Through the triangular	$Q_b = [C_1^* b + C_2^*(H - Z) \tan \theta](H - Z)^{3/2}$

Tabla 9: Fórmulas para calcular las características de la brecha que dependen solo de 5 variables. **Fuente:** Autor

Formulas that depend on 6 variables		
Progression of rectangular breaching in time	Singh - Linear erosion	$Z(t) = Z_0 + \frac{\alpha_2 A_4}{b} \ln \left\{ \frac{\alpha_2 A_4}{b(H_0 - Z_0) - \alpha_2 A_4} \times \left[-1 + \frac{\left((H_0 - Z_0)^{1/2} + \left(\frac{\alpha_2 A_4}{b} \right)^{1/2} \right)^2 + \left[(H_0 - Z_0)^{1/2} + \left(\frac{\alpha_2 A_4}{b} \right)^{1/2} \right] \exp \left[- \left(\frac{\alpha_2 A_4}{b} \right)^{1/2} t \right]}{\left((H_0 - Z_0)^{1/2} + \left(\frac{\alpha_2 A_4}{b} \right)^{1/2} \right)^2 - \left[(H_0 - Z_0)^{1/2} + \left(\frac{\alpha_2 A_4}{b} \right)^{1/2} \right] \exp \left[- \left(\frac{\alpha_2 A_4}{b} \right)^{1/2} t \right]} \right\} \quad (C)$
Rate of reservoir water depletion	Singh - Triangular breach and linear erosion	$\frac{\left(\frac{s}{\alpha_2 A_4} \right)^{1/2} (H - Z)}{-1 + \left(\frac{s}{\alpha_2 A_4} \right)^{1/2} (H_0 - Z_0) + \left[1 + \left(\frac{s}{\alpha_2 A_4} \right)^{1/2} (H_0 - Z_0) \right] \exp \left[2 \left(\frac{s}{\alpha_2 A_4} \right)^{1/2} (Z_0 - Z) \right]} = \frac{\left(\frac{s}{\alpha_2 A_4} \right)^{1/2} (H_0 - Z_0) + \left[1 + \left(\frac{s}{\alpha_2 A_4} \right)^{1/2} (H_0 - Z_0) \right] \exp \left[2 \left(\frac{s}{\alpha_2 A_4} \right)^{1/2} (Z_0 - Z) \right]}{1 - \left(\frac{s}{\alpha_2 A_4} \right)^{1/2} (H_0 - Z_0) + \left[1 + \left(\frac{s}{\alpha_2 A_4} \right)^{1/2} (H_0 - Z_0) \right] \exp \left[2 \left(\frac{s}{\alpha_2 A_4} \right)^{1/2} (Z_0 - Z) \right]} \quad (CS)$
	Singh - Trapezoidal breach and linear erosion	$\ln \left[\frac{\left(\frac{s}{2} - \frac{A_4}{2} + s \left[s(H - Z) \left(\frac{s}{2} - \frac{A_4}{2} \right) \right]^{1/2} \right)}{\left(\frac{s}{2} - A_4 - s \left[s(H - Z) \left(\frac{s}{2} - \frac{A_4}{2} \right) \right]^{1/2} \right)} \right] - 2i \left[\frac{\frac{s}{2} - \frac{A_4}{2}}{\frac{s}{2} + \frac{A_4}{2}} \right]^{1/2} \tan^{-1} \left[\frac{s(H - Z)}{\frac{s}{2} + \frac{A_4}{2}} \right] \\ = ut \frac{\alpha_1}{s} \left(\frac{s}{2} - \frac{A_4}{2} \right) A_4 + \ln \left[\frac{\left(\frac{s}{2} - \frac{A_4}{2} + s \left[s(H_0 - Z_0) \left(\frac{s}{2} - \frac{A_4}{2} \right) \right]^{1/2} \right)}{\left(\frac{s}{2} - \frac{A_4}{2} - s \left[s(H_0 - Z_0) \left(\frac{s}{2} - \frac{A_4}{2} \right) \right]^{1/2} \right)} \right] - \\ - 2i \left[\frac{\frac{s}{2} - \frac{A_4}{2}}{\frac{s}{2} + \frac{A_4}{2}} \right]^{1/2} \tan^{-1} \left[\frac{s(H_0 - Z_0)}{\frac{s}{2} + \frac{A_4}{2}} \right] \quad (C)$
Hydraulic head with rectangular breach	Singh - Nonlinear erosion	$H - Z = \left(\frac{\alpha_1 \alpha_2 A_4 (H_0 - Z_0)^{1/2}}{\left((H_0 - Z_0)^{1/2} - \left[b(H_0 - Z_0)^{1/2} - \alpha_1 \alpha_2 A_4 \right] \exp \left(- \frac{\alpha_1 \alpha_2 t}{2} \right) \right)} \right)^2$
Breach width (m)	Xu and Zhang (2009) - Average width	$\frac{B_{ave}}{h_b} = 0.787 \left(\frac{h_d}{h_r} \right)^{0.133} \left(\frac{I_w^{1/3}}{h_w} \right)^{0.652} e^{\beta_1}$
	Xu and Zhang (2009) - Top width	$\beta_1 = 1.062 \left(\frac{h_d}{h_r} \right)^{0.692} \left(\frac{I_w^{1/3}}{h_w} \right)^{0.505} e^{\beta_2}$
Breach formation time (hrs)	Xu and Zhang (2009)	$\frac{T_f}{T_r} = 0.304 \left(\frac{h_d}{h_r} \right)^{0.707} \left(\frac{I_w^{1/3}}{h_w} \right)^{1.228} e^{\beta_2}$
Flow through the breach	Singh(1988)	$Q_b = [C_1^* b + C_2^* (H - Z)] \tan \theta (H - Z)^{3/2}$

Tabla 10: Fórmulas para calcular las características de la brecha que dependen solo de 1 variable. **Fuente:** Autor

Formulas that depend on 7 variables		
Rate of reservoir water depletion with a triangular breach (Nonlinear erosion)	Singh	$H - Z = \frac{(H_0 - Z_0)}{\left\{ \frac{s}{\alpha_1 \alpha_2 A_4} (H_0 - Z_0)^{3/2} + \left[1 - \frac{s}{\alpha_1 \alpha_2 A_4} (H_0 - Z_0)^{3/2} \right] \exp \left(- \frac{3}{2} \alpha_1 \alpha_2 t \right) \right\}^{2/3}} \quad (C)$
Rate of trapezoidal breach erosion (Linear erosion)	Singh	$\frac{2s(H - Z)}{(A_4 - b) \left[A_4 + b + 2s(H_0 - Z_0) \right] - (A_4 + b) \left[A_4 - b - 2s(H_0 - Z_0) \right] \exp \left[\frac{A_4 (Z - Z_0)}{\alpha_2 A_4} \right]} = \frac{A_4 + b + 2s(H_0 - A_0) + \left[A_4 + b - 2s(H_0 - Z_0) \right] \exp \left[\frac{A_4 (Z - Z_0)}{\alpha_2 A_4} \right]}{\left[A_4 + b + 2s(H_0 - Z_0) \right] \exp \left[\frac{A_4 (Z - Z_0)}{\alpha_2 A_4} \right]} \quad (C)$
Breach bottom of a rectangular breach (Nonlinear erosion)	Singh	$\frac{b}{\alpha_1 \alpha_2 A_4} \left[(H - Z)^{1/2} - (H_0 - Z_0)^{1/2} \right] + \ln \left\{ \frac{1 - \frac{b}{\alpha_1 \alpha_2 A_4} (H - Z)^{1/2}}{1 - \frac{b}{\alpha_1 \alpha_2 A_4} (H_0 - Z_0)^{1/2}} \right\} = \frac{1}{2} \left(\frac{b}{\alpha_1 \alpha_2 A_4} \right)^2 (Z - Z_0)$
Rate of triangular breach erosion (Linear erosion)	Singh	$\ln \left[\frac{\left(\frac{\alpha_1 A_4}{s} \right)^{1/4} - (H - Z)^{1/2}}{\left(\frac{\alpha_1 A_4}{s} \right)^{1/4} + (H - Z)^{1/2}} \right] - 2 \tan^{-1} \left[\frac{(H - Z)^{1/2}}{\left(\frac{\alpha_1 A_4}{s} \right)^{1/4}} \right] \\ = -2 \frac{\alpha_1 \alpha_2^{3/4} A_4^{1/4}}{A_4^{1/4}} t + \ln \left[\frac{\left(\frac{\alpha_1 A_4}{s} \right)^{1/4} - (H_0 - Z_0)^{1/2}}{\left(\frac{\alpha_1 A_4}{s} \right)^{1/4} + (H_0 - Z_0)^{1/2}} \right] - \\ - 2 \tan^{-1} \left[\frac{(H_0 - Z_0)^{1/2}}{\left(\frac{\alpha_1 A_4}{s} \right)^{1/4}} \right]$

Tabla 11: Fórmulas para calcular las características de la brecha que dependen solo de 7 variables. **Fuente:** Autor

11.6. Presentación de variables

Explicaremos el significado de cada variable con la finalidad de que se puedan reproducir las fórmulas mencionadas

Según Vijay P. Singh en 1996 (SINGH), publicó algunas fórmulas que describen el comportamiento de la formación de brechas.

Donde:

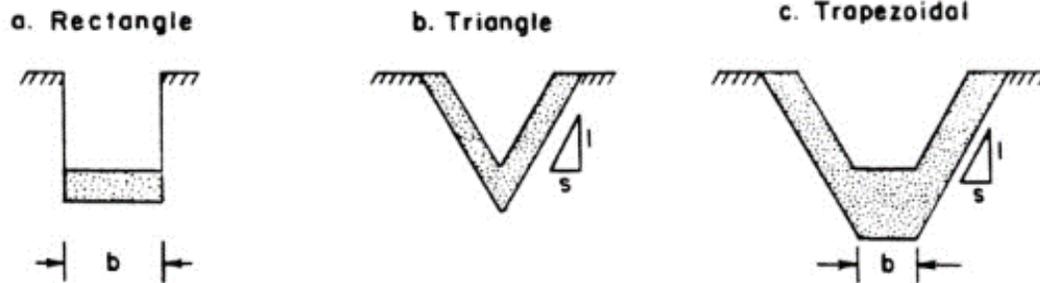


Figura 1: Parámetros de cálculo de Singh representados en una presa. Fuente: Singh (1996)

Y α_1 y β_1 son coeficientes empíricos; y Z es la elevación de la base de la brecha de datos de referencia. Para condiciones de flujo críticas, estos coeficientes se dan como

$$\alpha_1 = \left[\left(\frac{2}{3} \right)^3 * g \right]^{0.5} \text{ e } \beta_1 = 0.5 \quad (\text{En unidades SI.})$$

El sistema hidráulico del flujo sobre la cresta de la presa y a través de la brecha es similar al flujo sobre una presa de cresta ancha (BRATER, 1959). Dado que las aceleraciones locales en las proximidades del espacio son mucho más pequeñas que las aceleraciones convectivas, se pueden aplicar condiciones casi estables. Por lo tanto, ambas salidas del flujo, sobre la cima y a través de un espacio trapezoidal se pueden abordar como

$$Q_0 = C_1^* * (B_D - B) * (H - Z_0)^{3/2}$$

$$Q_0 = [C_1^* b + C_2^* (H - Z) \tan \theta] * (H - Z_0)^{3/2}$$

Donde C_1^* y C_2^* son coeficientes adimensionales, B_D es el ancho de la cima de la represa, Z es la elevación del fondo de la brecha medida a partir de los datos de referencia y θ es el ángulo entre el lado de la brecha y la vertical. Los valores teóricos de C_1^* y C_2^* en el sistema de unidades SI (metros y segundos) son 1,7 y 1,35, respectivamente. Considerando los efectos de la velocidad de aproximación,

estos valores se reducen adecuadamente (BRATER, 1959). Para $b = 0$, la siguiente ecuación corresponde a un espacio triangular y para $\theta = 0$, rectangular.

También,

$$A_6 = (b^2 + 4 * \alpha_2 * s * A_s)^{0.5}$$

A continuación, se presentarán bocetos más detallados del espacio triangular y trapezoidal para comprender mejor el mecanismo de ruptura.

❖ Brecha triangular

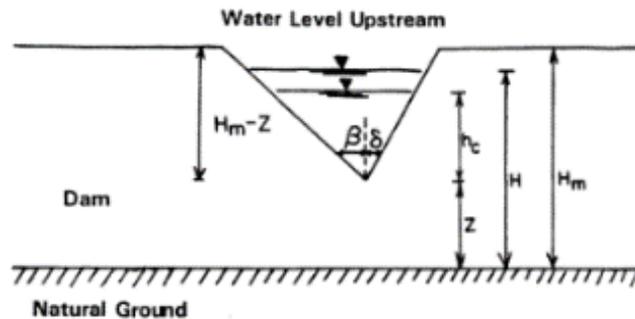


Figura 2: Parámetros de cálculo de Singh representados en una represa
Fuente: Singh (1996)

❖ Brecha trapezoidal

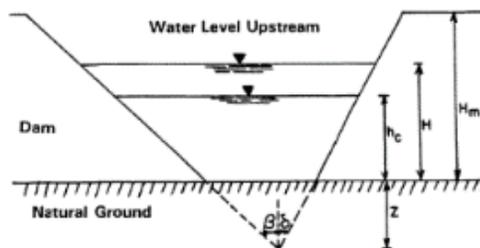


Figura 3: Parámetros de cálculo de Singh representados en una represa
Fuente: Singh (1996)

La descripción de cada variable se encuentra en la siguiente tabla

As(H)	Water-surface area within the reservoir
H	Water elevation
dH/dt	Rate of depletion of water elevation
Qb	Breach outflow discharge
Qo	Outflow discharge over the crest of the dam
Qsp	Outflow discharge through the spillway and the powerhouse
Ab	Wet breach cross section
Z	Breach bottom elevation
b	Bottom width of the breach
s	Average slope (s ; 1) of the upstream face of dam
α_1	Empirical coefficient
α_2	Empirical coefficient
As	Initial water-surface area within the reservoir
Ho	Initial water elevation
Zo	Elevation of dam crest
t	Tempo involve in the process
C1*	Dimensional coefficient (C1*=1,7)
C2*	Dimensional coefficient (C2*=1,35)
Bd	Width of the crest of the dam
θ	Angle between the breach side and the vertical
yo	Normal flow depth immediately downstream os the dam (Brater, 1954)
Ds	Representative diameter of the sediments
Ke	Constant
τ	Bed shear stress
H_0^t	Hydraulic head at the instant that the erosion is terminated
Bb	Final width of the breach (m)
Hb	Final height of the breach (m)

Tabla 12: Leyenda de los parámetros propuestos por Singh. **Fuente:** Singh

- Según Mohamed (MOHAMED; SAMUELS; MORRIS, 2001) los parámetros para estimar el caudal a través de la brecha
 - ✓ Qb: Flujo dentro de la brecha del canal (cfs)
 - ✓ Bo: Ancho de espacio instantáneo (pies)
 - ✓ H: Nivel de agua en la presa (pies)
 - ✓ Hc: Nivel base de la brecha (pies)
- Froehlich hizo propuestas importantes en 2 investigaciones diferentes
 - ❖ Froehlich (1995a) (FROEHLICH, 1995)

Para el cálculo del tiempo de formación de huecos, Froehlich hace las siguientes consideraciones

Froehlich afirma que las pendientes laterales medias deben ser:

1.4H: 1V para desbordamiento de rupturas
0.9H: 1V para otros tipos de roturas

Y los datos analizados tenían las siguientes características
Los datos que Froehlich utilizó para su análisis de regresión tenían los siguientes intervalos

Altura de las presas: 3,66 - 92,96 m (12 - 305 pies) con 90% <30 m y 76% <15 m

Volumen del agua en el momento de la ruptura: 0.0130 - 660 m³ * 106 (11 - 535,000 acre-ft) con 87% <25 m³ * 106 y 76% <15 m³ * 106

❖ Froehlich (2008) (FROEHLICH, 2008)

Posteriormente, Froehlich profundiza su investigación, dando como resultado una herramienta para calcular el tiempo de formación del hueco en segundos.

$$t_f = 63,2 * V_{wg} * h_b^2$$

Indica que la pendiente promedio de la brecha debe ser:

1H: 1V para roturas por sobrepasado
0.7H: 1V para otros tipos de ruptura (Ejemplo: Tubería o Infiltración)

Con las siguientes limitaciones:

Los datos que Froehlich utilizó para su análisis de regresión tenían los siguientes intervalos

Altura de las presas: 3,05 - 92,96 m (10 - 305 pies) con 93% <30 m y 81% <15 m

Volumen de agua en el momento de la ruptura: 0.0130 - 660 m³ * 106 (11.3 - 535,000 acre-ft) con 86% <25 m³ * 106 y 82% <15 m³ * 106

La descripción de cada variable se encuentra en la siguiente tabla:

Ko	Constant (1.4 for overtopping failures, 1.0 for piping)
Vw	Reservoir volume at time of failure (m ³)
hb	Height of the final breach (m)

Tabla 13: Leyenda de los parámetros propuestos por Froehlich. **Fuente:** Froehlich

- MacDonald and Langridge – Monopolis (MACDONALD; LANGRIDGE-MONOPOLIS, 1984)
El cálculo del volumen erosionado se realiza con las siguientes limitaciones
Altura de las presas: 4,27 - 92,96 m (14 - 305 pies) con 76% <30 my 57% <15 m

Volumen de agua en el momento de la ruptura: 0,0037 - 660 m³ * 106 (3 - 535,000 acre-ft) con 79% <25 m³ * 106 y 69% <15 m³ * 106

La descripción de cada variable se da en la siguiente tabla:

Vout	Volume of water that passes through the breach (m ³)
Vw	Volume of the water behind the dam at failure
hw	Depth of water above the bottom of breach (m)
hb	Height from the top of the dam to bottom of breach (m)
C	Crest width of the top of dam (m)
Z3	Z1+Z2
Z1	Average slope (Z1;1) of the upstream face of dam
Z2	Average slope (Z2;1) of the upstream face of dam
Zb	Side slopes of the breach (Zb;1), 0.5 for the MacDonald method

Tabla 14: Leyenda de los parámetros propuestos por MacDonald y Langridge – Monopolis. **Fuente:** MacDonald y Langridge - Monopolis

- Von Thun y Gillete (1990)
El coeficiente Cb para calcular el ancho de la brecha promedio se obtiene de la siguiente tabla

Tamaño do Reservatorio (m ³)	Cb (m)	Tamaño do Reservatorio (acre-feet)	Cb (feet)
< 1.23*10 ⁶	6.1	< 1000	20
1.23*10 ⁶ - 6.17* 10 ⁶	18.3	1000 - 5000	60
6.17*10 ⁶ - 1.23* 10 ⁷	42.7	5000 - 10000	140
> 1.23*10 ⁷	54.9	> 10000	180

Tabla 15: Valores de Cb constante según tamaño del embalse. **Fuente:** Von Thun y Gillete (1990)

La fórmula Bave = 2.5 * hw * Cb se puede utilizar teniendo en cuenta sus límites:

Altura de las presas: 3,66 - 92,96 m (12 - 305 pies) con 89% <30 my 75% <15 m

Volumen de agua en la rotura: 0.027 - 660 m³ * 106 (22 - 535,000 acre-ft) con 89% <25 m³ * 106 y 84% <15 m³ * 106

La descripción de cada variable se encuentra en la siguiente tabla

hw	Depth of water above the bottom of breach (m)
Cb	Coefficient, which is a function of reservoir size
Bave	Average breach width (m)

Tabla 16: Leyenda de los parámetros propuestos por Von Thun y Gillete. **Fuente:** Von Thun y Gillete (1990)

- Xu y Zhang (XU; ZHANG, 2009)
La descripción de cada variable se encuentra en la siguiente tabla

Vw	Reservoir volume at time of failure (m ³)
hb	Height of the final breach (m)
hd	Height of the dam (m)
hr	15 meters, which is considered to be a reference height for distinguishing large dams from small dams
hw	Height of the water above the breach bottom elevation at time of breach (m)
B3	Coefficient that is a function of dam properties ($B3=b3+b4+b5$)
b3	= -0.041, 0.026, and -0.226 for dams with corewalls, concrete faced dams, and homogeneous/zoned-fill dams, respectively
b4	= 0.149 and -0.389 for overtopping and seepage/piping respectively
b5	= 0.291, -0.14, and -0.391 for high, medium, and low dam erodibility, respectively
B2	Coefficient that is a function of dam properties ($B2=b3+b4+b5$)
b3	= 0.061, 0.088, and -0.089 for dams with corewalls, concrete faced dams, and homogeneous/zoned-fill dams, respectively
b4	= 0.299 and -0.239 for overtopping and seepage/piping respectively
b5	= 0.411, -0.062, and -0.289 for high, medium, and low dam erodibility, respectively
Tr	1 hour (unit duration)
B5	Coefficient that is a function of dam properties ($B5 = b3+b4+b5$)
b3	= -0.327, -0.674, -0.189 for dams with corewalls, concrete faced dams, and homogeneous/zoned-fill dams, respectively
b4	= -0.579 and -0.611 for overtopping and seepage/piping, respectively
b5	= -1.205, -0.564, and 0.579 for high, medium, and low dam erodibility, respectively

Tabla 17: Leyenda de los parámetros propuestos por Xu y Zhang. **Fuente:** Xu y Zhang (2009)

- Costa (COSTA, 1985)
A continuación, se muestra la descripción de cada variable:
 - ✓ S: Volumen del depósito (m³)
 - ✓ hd: Altura de la presa (m)
- Evans
Dónde:
Vw: Volumen de agua almacenado por encima de la brecha invertido en el momento de la falla.

- Macchione (MACCHIONE, 2008)

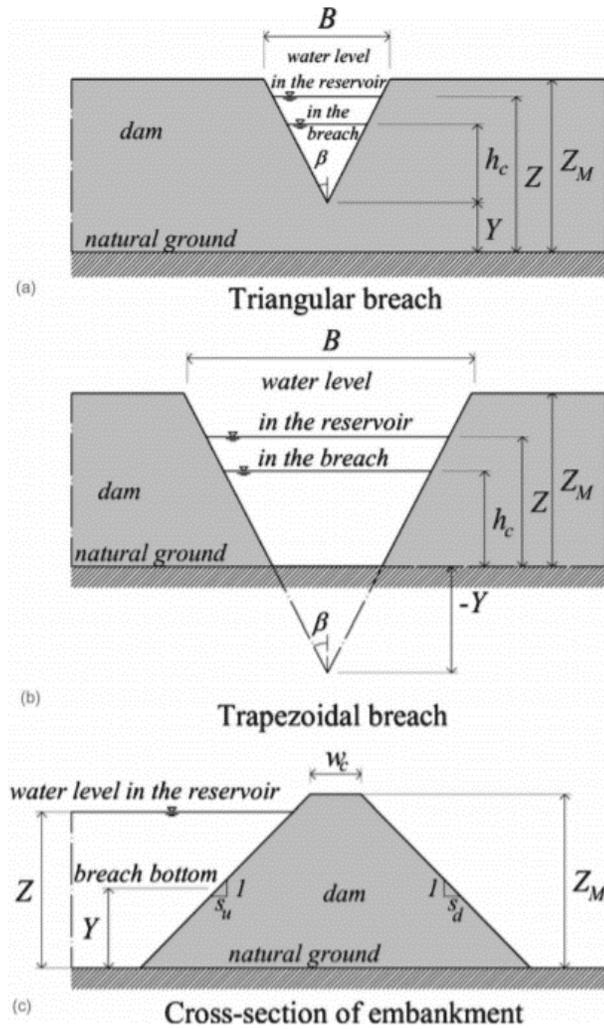


Figura 4: Parámetros de cálculo de Macchione representados en la represa.
Fuente: Macchione (2008)

La descripción de cada variable se encuentra en la siguiente tabla

W_0	Coefficient that varies between 1 and 4 (Marone 1971)
α_0	Coefficient that varies between 1 and 4 (Marone 1971)
h_c	Critical depth
Y	Difference in elevation between intersection point of sides of breach and base of dam
Z	Surface level in reservoir with respect to base of dam
β	Angle that sides of breach form with vertical

Tabla 18: Leyenda de los parámetros propuestos por Macchione. **Fuente:** Macchione

- Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)

Dónde:

- ✓ Hd: altura de la presa (m)
- Apud U.S. Army Corps of Engineers (1997)

La descripción de cada variable se encuentra en la siguiente tabla

Bd	Largura final da brecha (m)
Ymedio	Profundidade média no reservatório no instante da ruptura (m)

Tabla 19: Leyenda de parámetros propuestos por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. (1997). **Fuente:** U.S. Army Corps of Engineers (1997)

- Schoklistch (1917)

La descripción de cada variable se encuentra en la siguiente tabla

Bd	Largura da barragem (m)
Bb	Largura final da brecha
Ymedio	Profundidade média no reservatório no instante da ruptura (m)

Tabla 20: Leyenda de los parámetros propuestos por Schiklistch. **Fuente:** Schiklistch (1917)

- Wetmore y Fread (1981)

La descripción de cada variable se encuentra en la siguiente tabla

Bb	Largura final da brecha
Hb	Altura final da brecha (m)
As	Área do reservatório para o nível de água máximo (m ²)
Tp	Tempo para desenvolvimento da brecha (s)

Tabla 21: Leyenda de los parámetros propuestos por Wetmore y Fread. **Fuente:** Wetmore y Fread (1981)

- Pierce (PIERCE; THORNTON; ABT, 2010)

La descripción de cada variable se encuentra en la siguiente tabla

H	Height of the water behind the dam
V	Volume of water behind the dam (m3)

Tabla 22: Leyenda de los parámetros propuestos por Pierce (2010)
Fuente: Pierce (2010)

- El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos publicó un informe sobre presas y embalses de tierra (USDA, 2005)
 Si H_w es mayor de 103 pies, se usa la primera fórmula:

$$Q_{max} = (65) * H_w^{1.85}$$

Pero si eres menor de edad usa el segundo:

$$Q_{max} = (1,100) * Br^{1.35}$$

Y considerando el valor de Br como:

$$Br = \frac{V_s * H_w}{A}$$

Tenga en cuenta que el valor final de la segunda fórmula no puede ser menor que

$$Q_{max} = (3.2) * H_w^{2.5}$$

ni mayor que

$$Q_{max} = (65) * H_w^{1.8}$$

La descripción de cada variable se encuentra en la siguiente tabla:

Br	Breach factor, acre
Vs	Reservoir storage at the time of failure, acre-ft
Hw	Depth of water at the dam at the time of failure; however, if the dam is overtopped, depth is set equal to the height of dam, ft
A	Cross-sectional area of embankment at the assumed location of breach, usually the template section (normal to the dam longitudinal axis) at the general flood plain location, ft
T	Theoretical breach width at the water surface elevation corresponding to the depth, Hw, for the equation, $Q_{max}=(65)H_w^{1.85}$,ft
L	Width of the valley at the water surface elevation corresponding to the depth, Hw, ft

Tabla 23: Leyenda de parámetros propuestos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos. **Fuente:** Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

- Según Hagen (HAGEN, 1982) el cálculo del flujo máximo a través de la brecha se puede calcular utilizando los siguientes parámetros:

S	Reservoir storage (m3)
hd	Height of dam (m)
V	Volume of water behind the dam (m3)

Tabla 24: Leyenda de los parámetros propuestos por Hagen (1982). **Fuente:** Hagen (1982)

- En el estudio realizado por la Fundación Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), las hipotéticas rupturas de las presas ubicadas en los ríos de la Cuenca Hidrológica del Paranapanema indican el trabajo de otros autores cuyas siguientes variables se utilizan para calcular las características de la ruptura producida por la ruptura de la represa (Apud, FCTH ; Duke-Energy)

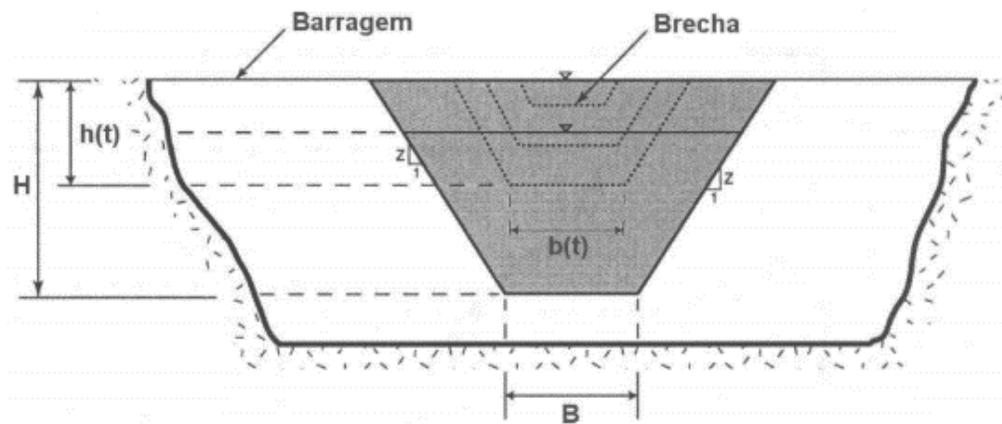


Figura 5: Sección longitudinal de una presa que indica una brecha
Fuente: Software HecRas

- ✓ Z = pendientes laterales del hueco (1H: ZV)
- ✓ B = ancho máximo de la base del hueco
- ✓ H = altura máxima del espacio
- ✓ T = tiempo total de evolución del gap; es decir, el intervalo de tiempo desde el inicio del proceso de rotura hasta el momento en que el gap alcanza su configuración final, con geometría definida por los parámetros B y H
- ✓ t = tiempo transcurrido desde el inicio del proceso de rotura.

El rango de variación recomendado para el exponente ρ está entre 1 y 4, donde $\rho = 1$ corresponde a una evolución lineal de la brecha en el tiempo y $\rho = 2$ a una evolución cuadrática.

12. Resultados finales y análisis de datos

En esta etapa se calcularon los caudales máximos de la ruptura por Piping y Overtopping en las represas Jurumirim y Chavantes. Teniendo en cuenta las siguientes geometrías de la sección longitudinal de cada una de las presas.

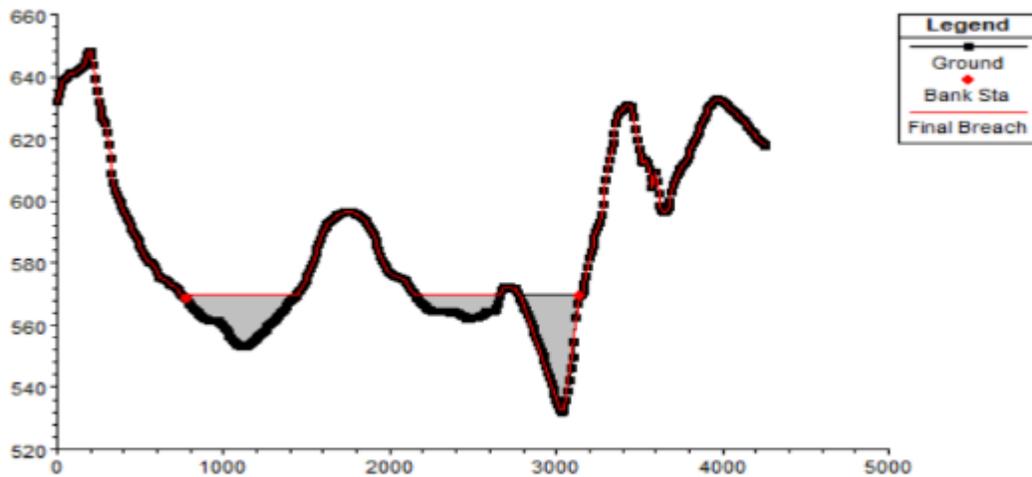


Figura 6: Sección longitudinal de la presa Jurumirim
Fuente: Software HecRas

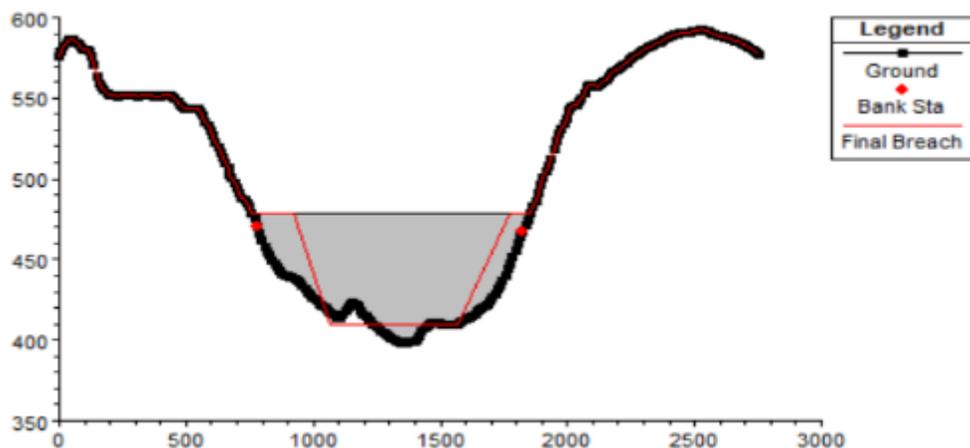


Figura 7: Sección longitudinal de la presa Jurumirim
Fuente: Software HecRas

Y la geometría parcial del río Paranapanema en HecRas e información de las presas Jurumirim y Chavantes.

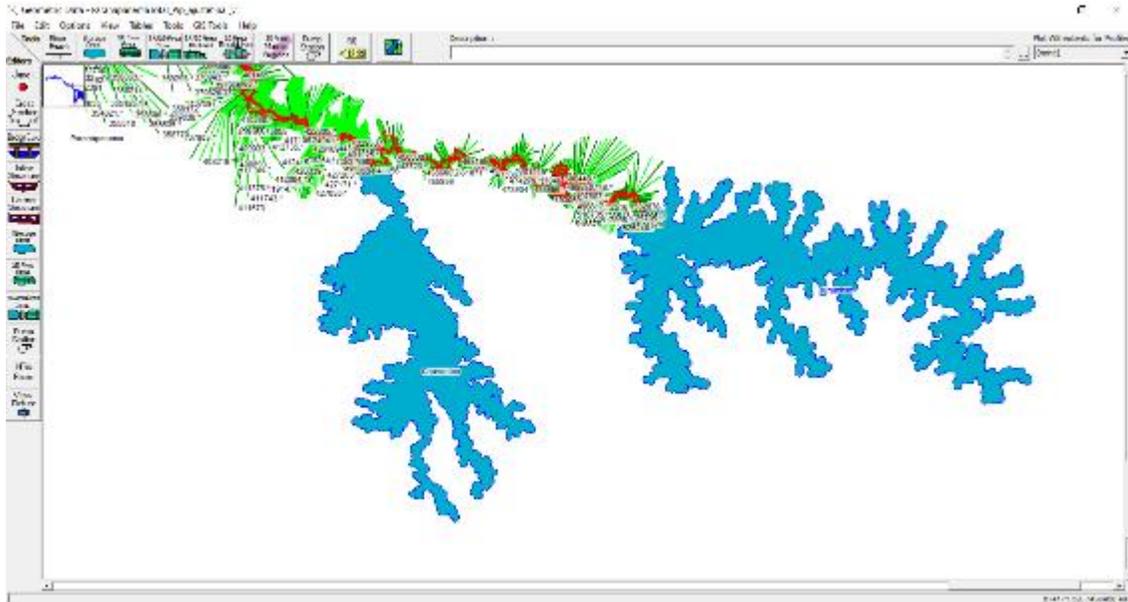


Figura 8: Datos geométricos del río Paranapanema con información sobre las presas Jurumirim y Chavantes. **Fuente:** Software HecRas

Podemos dividir los resultados generados en 4 categorías:

- Represa Jurumirim con ruptura por Overtopping
- Represa Jurumirim con ruptura por Piping
- Represa Chavantes con ruptura por Overtopping
- Represa Chavantes con ruptura de Piping

12. Resultados finales y análisis de datos

12.1. Represa Jurumirim con ruptura por Overtopping

Se analizaron 18 casos con datos de entrada ligeramente diferentes para el análisis de ruptura por Overtopping de la presa Jurumirim, ya que había varias alternativas a considerar. Por ejemplo, la geometría del área longitudinal de la presa, diferentes formas de desborde y diferentes condiciones de contorno.

12.1.1. Caso 6

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada utilizados

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568	hw (dam)	29.32
b	92.76	C1*	1.7
B	364.07	C2*	1.35
m	4.33	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	29.32		0.05
hdam	31.32	α₁	1.704894914
h min op	21.02	β₁	0.5
Breach base level	538.68	α₁	1
Nivel da base da barragem	538.68	α₂	4
Borda livre	2	Bd	6
Ab (m2)	6442.061392	Veroded (m3)	94674.85395
Abrecha	7153.9578	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.798
Y	10.7204157	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	5737.299401	B5	-2.458
angulo	1.343828816	rad	76.99553951

Tabla 25: Datos de la represa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada, podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3/s)
Pierce (2008)	1	6437.385596
Pierce (2008)	2	5658.615823
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143
SCS (1981)	6	8597.287004
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	8585.86194
Froehlich (1995b)	13	33099.08675
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	10870.41914
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	44180.22707
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	140348.5939
Macchione	25	8190.12
Macchione	26	7807.685695

Tabla 26: Caudales pico calculadas por las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos do Software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		6
Descrição		JOS1a.ed
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		25
Final Bottom Elevation		533
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.17
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		568
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	800
	06/jan	800
	07/jan	800
	08/jan	800
	09/jan	800
	10/jan	800
Maximum Flow (m3/s)		39814.14
Data		03/jan

Tabla 27: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante
Fuente: Autor

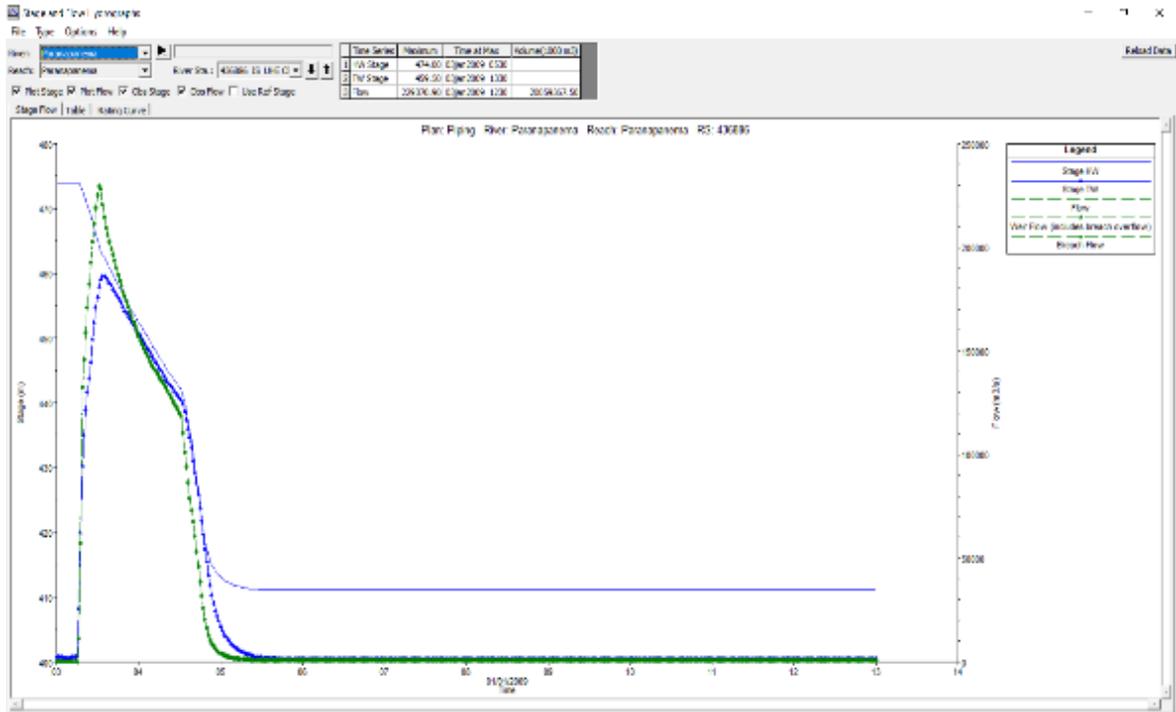


Figura 9: Hidrograma Resultante da análise em HecRas

Fonte: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m ³ /s)	Q-HecRas(m ³ /s)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6437.385596	39814.14	-84%	
Pierce (2008)	2	5658.615823	39814.14	-86%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	39814.14	438%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	39814.14	98%	
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143	39814.14	-75%	
SCS (1981)	6	8597.287004	39814.14	-78%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	39814.14	-77%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	39814.14	98%	
Costa (1985)	9	486289.4272	39814.14	1121%	
Evans (1986)	10	125505.3961	39814.14	215%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	39814.14	-86%	
NRCS apud	12	8585.86194	39814.14	-78%	
Froehlich (1995b)	13	33099.08675	39814.14	-17%	0-20%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574	39814.14	38%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414	39814.14	350%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	39814.14	568%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	39814.14	783%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	10870.41914	39814.14	-73%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066	39814.14	-31%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	39814.14	49%	0-50%
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	39814.14	576%	
Mohamed e.t.	22	44180.22707	39814.14	11%	0-20%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	39814.14	-84%	
Xu and Zhang (2009)	24	140348.5939	39814.14	253%	
Macchione	25	8190.12	39814.14	-79%	
Macchione	26	7807.685695	39814.14	-80%	

Tabla 28: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

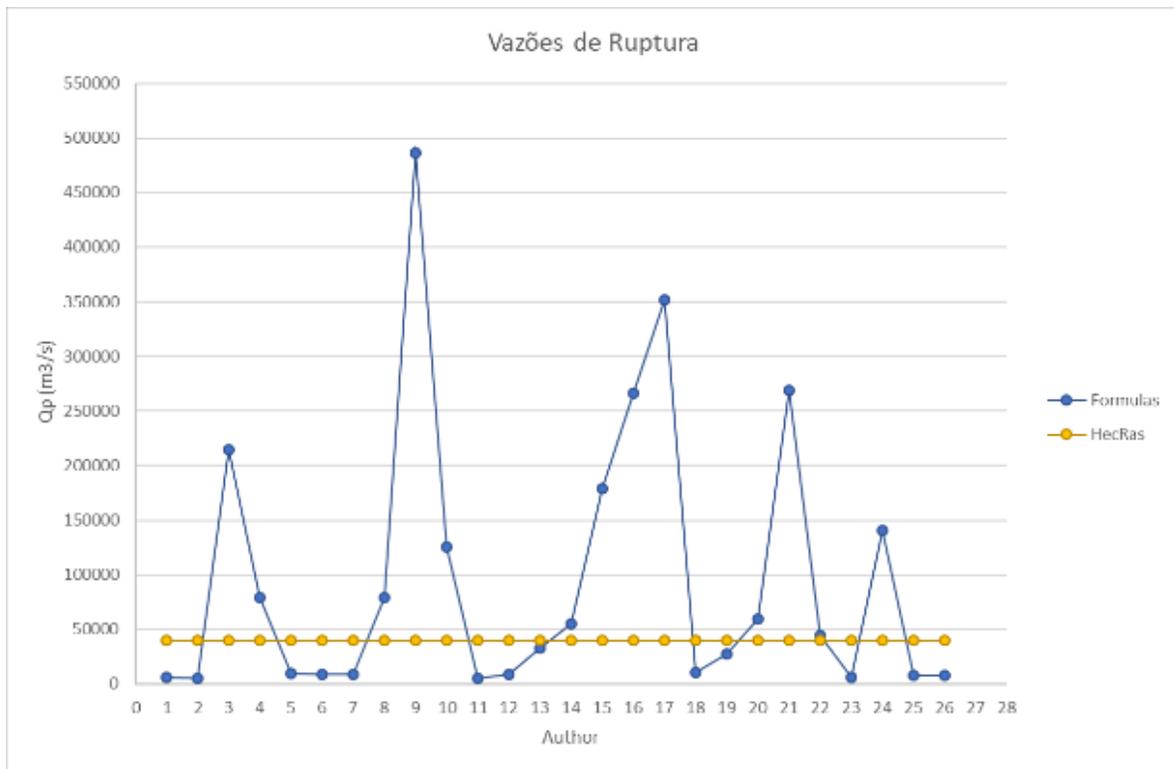


Figura 10: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleira espessa (Singh, 1996) con 50%
- Costa (1985) con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) con 50%
- Froehlich (1995b) con 20%
- Mohamed e.t. con 20%

12.1.2. Caso 7

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada utilizados

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	569.5	hw (dam)	30.82
b	92.76	C1*	1.7
B	364.07	C2*	1.35
m	4.33	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	30.82		0.05
hdam	31.32	α_1	1.704894914
h min op	21.02	β_1	0.5
Breach base level	538.68	α_1	1
Nivel da base da barragem	538.68	α_2	4
Borda livre	0.5	Bd	6
Ab (m2)	6971.810692	Veroded (m3)	94674.85395
Abrecha	7153.9578	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.798
Y	10.7204157	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	5737.299401	B5	-2.458
angulo	1.343828816	rad	76.99553951

Tabla 29: Datos de la represa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada, podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	7353.964537
Pierce (2008)	2	6215.732314
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	10848.60111
SCS (1981)	6	9428.627139
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	9416.097294
Froehlich (1995b)	13	35211.55138
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	56233.76422
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	182756.967
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	11359.88572
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	47613.59201
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	149559.481
Macchione	25	9942.60
Macchione	26	10512.58039

Tabla 30: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		7
Descrição		JOS1a.not
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		25
Final Bottom Elevation		533
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.27
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		569.5
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	800
	06/jan	800
	07/jan	800
	08/jan	800
	09/jan	800
	10/jan	800
Maximum Flow (m3/s)		39871.11
Data		03/jan

Tabla 31: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante.

Fuente: Autor

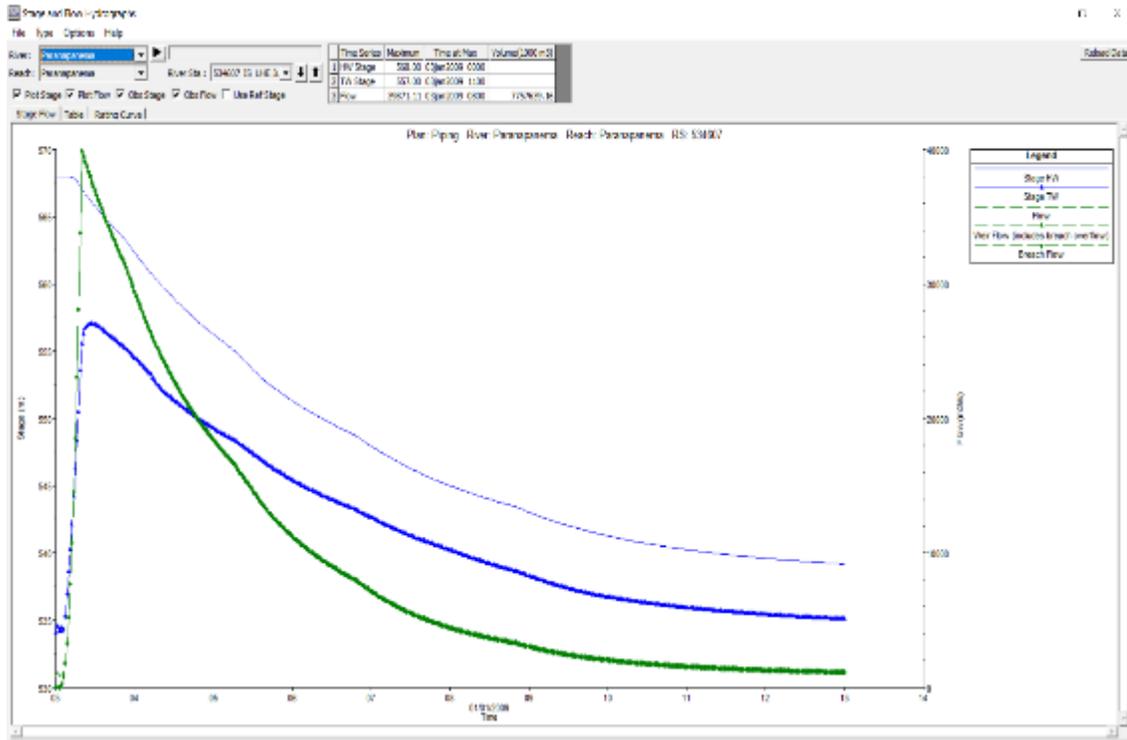


Figura 11: Hidrograma resultante del análisis en HecRAS
Fuente: Software HecRAS

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRAS. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	7353.964537	39871.11	-82%	
Pierce (2008)	2	6215.732314	39871.11	-84%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	39871.11	437%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	39871.11	98%	
Bureau of reclamation (1982)	5	10848.60111	39871.11	-73%	
SCS (1981)	6	9428.627139	39871.11	-76%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	39871.11	-77%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	39871.11	98%	
Costa (1985)	9	486289.4272	39871.11	1120%	
Evans (1986)	10	125505.3961	39871.11	215%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	39871.11	-86%	
NRCS apud	12	9416.097294	39871.11	-76%	
Froehlich (1995b)	13	35211.55138	39871.11	-12%	0-20%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	56233.76422	39871.11	41%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	182756.967	39871.11	358%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	39871.11	567%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	39871.11	781%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	11359.88572	39871.11	-72%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066	39871.11	-31%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	39871.11	49%	0-50%
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	39871.11	575%	
Mohamed e.t.	22	47613.59201	39871.11	19%	0-20%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	39871.11	-84%	
Xu and Zhang (2009)	24	149559.481	39871.11	275%	
Macchione	25	9942.60	39871.11	-75%	
Macchione	26	10512.58039	39871.11	-74%	

Tabla 32: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión

Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

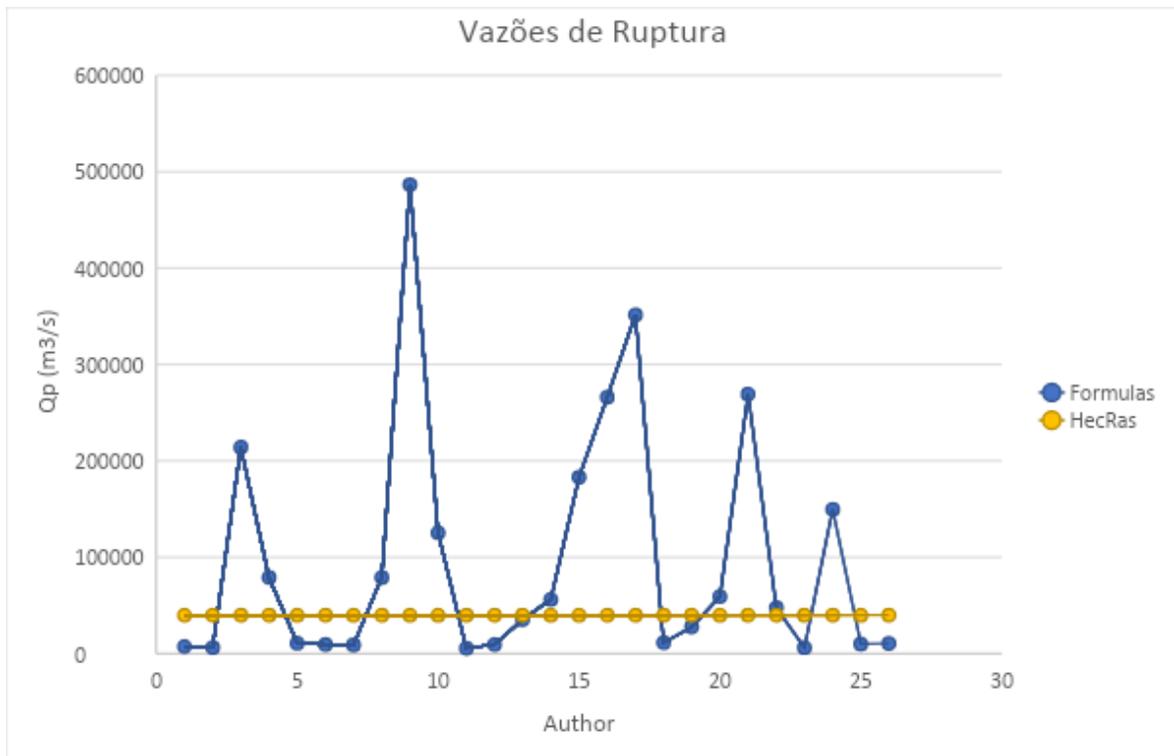


Figura 12: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleira espesa0 (Singh, 1996) con 50%
- Costa (1985) con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) con 50%
- Froehlich (1995b) con 20%
- Mohamed e.t. con 20%

12.1.3. Caso 8

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada utilizados

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568	hw (dam)	29.32
b	92.76	C1*	1.7
B	364.07	C2*	1.35
m	4.33	Tr (h)	1
hbreach	31.32	hr	15
hw (breach)	29.32		0.05
hdam	31.32	α₁	1.704894914
h min op	21.02	β₁	0.5
Breach base level	538.68	α₁	1
Nivel da base da barragem	538.68	α₂	4
Borda livre	2	Bd	6
Ab (m2)	6442.061392	Veroded (m3)	94674.85395
Abreach	7153.9578	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.798
Y	10.7204157	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	5737.299401	B5	-2.458
angulo	1.343828816	rad	76.99553951

Tabla 33: Datos de la represa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada, podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	6437.385596
Pierce (2008)	2	5658.615823
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143
SCS (1981)	6	8597.287004
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	8585.86194
Froehlich (1995b)	13	33099.08675
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	10870.41914
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	44180.22707
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	140348.5939
Macchione	25	8190.12
Macchione	26	7807.685695

Tabla 34: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		8
Descrição		JOS1b.ed
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		25
Final Bottom Elevation		533
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.17
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		568
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	1000
	06/jan	1200
	07/jan	1500
	08/jan	1800
	09/jan	2000
	10/jan	2500
Maximum Flow (m3/s)		39814.14
Data		03/jan

Tabla 35: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante

Fuente: Autor

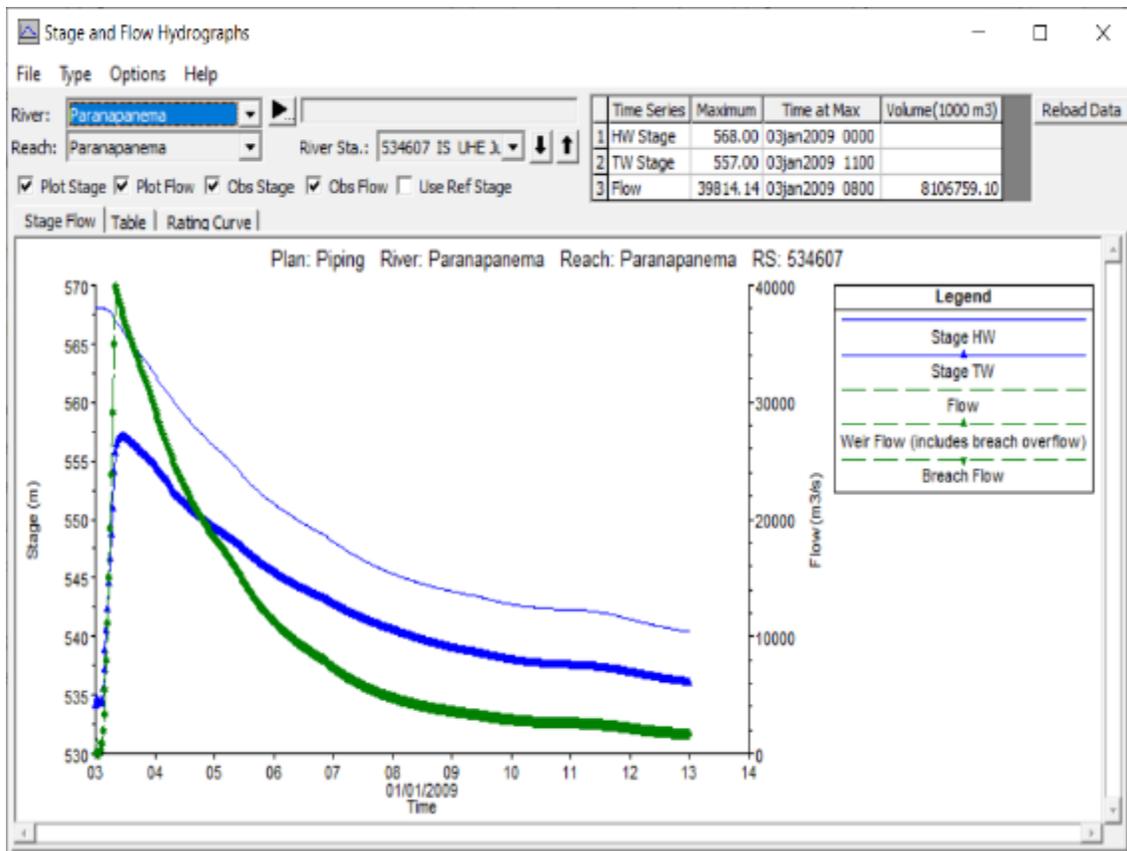


Figura 13: Hidrograma resultante del análisis HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6437.385596	39814.14	-84%	
Pierce (2008)	2	5658.615823	39814.14	-86%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	39814.14	438%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	39814.14	98%	
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143	39814.14	-75%	
SCS (1981)	6	8597.287004	39814.14	-78%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	39814.14	-77%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	39814.14	98%	
Costa (1985)	9	486289.4272	39814.14	1121%	
Evans (1986)	10	125505.3961	39814.14	215%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	39814.14	-86%	
NRCS apud	12	8585.86194	39814.14	-78%	
Froehlich (1995b)	13	33099.08675	39814.14	-17%	0-20%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574	39814.14	38%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414	39814.14	350%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	39814.14	568%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	39814.14	783%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	10870.41914	39814.14	-73%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066	39814.14	-31%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	39814.14	49%	0-50%
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	39814.14	576%	
Mohamed e.t.	22	44180.22707	39814.14	11%	0-20%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	39814.14	-84%	
Xu and Zhang (2009)	24	140348.5939	39814.14	253%	
Macchione	25	8190.12	39814.14	-79%	
Macchione	26	7807.685695	39814.14	-80%	

Tabla 36: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión

Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

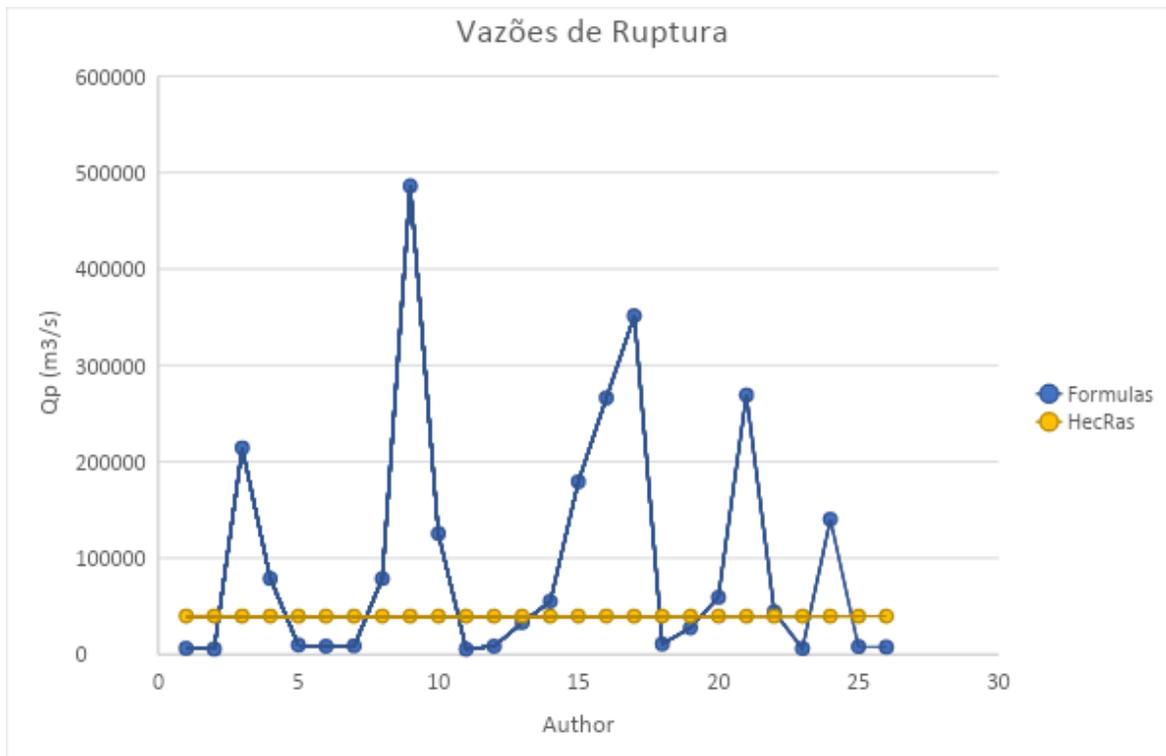


Figura 14: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleira espessa (Singh, 1996) con 50%
- Costa (1985) con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) con 50%
- Froehlich (1995b) con 20%
- Mohamed e.t. con 20%

12.1.4. Caso 9

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada utilizados

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	569.5	hw (dam)	30.82
b	92.76	C1*	1.7
B	364.07	C2*	1.35
m	4.33	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	30.82		0.05
hdam	31.32	α₁	1.704894914
h min op	21.02	β₁	0.5
Breach base level	538.68	α₁	1
Nivel da base da barragem	538.68	α₂	4
Borda livre	0.5	Bd	6
Ab (m2)	6971.810692	Veroded (m3)	94674.85395
Abrecha	7153.9578	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.798
Y	10.7204157	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	5737.299401	B5	-2.458
angulo	1.343828816	rad	76.99553951

Tabla 37: Datos de la represa a partir de la cual haremos los cálculos.
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada, podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	7353.964537
Pierce (2008)	2	6215.732314
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	10848.60111
SCS (1981)	6	9428.627139
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	9416.097294
Froehlich (1995b)	13	35211.55138
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	56233.76422
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	182756.967
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	11359.88572
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	47613.59201
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	149559.481
Macchione	25	9942.60
Macchione	26	10512.58039

Tabla 38: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		9
Descrição		JOS1b.not
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		25
Final Bottom Elevation		533
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.27
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		569.5
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	1000
	06/jan	1200
	07/jan	1500
	08/jan	1800
	09/jan	2000
	10/jan	2500
Maximum Flow (m3/s)		39871.11
Data		03/jan

Tabla 39: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante

Fuente: Autor

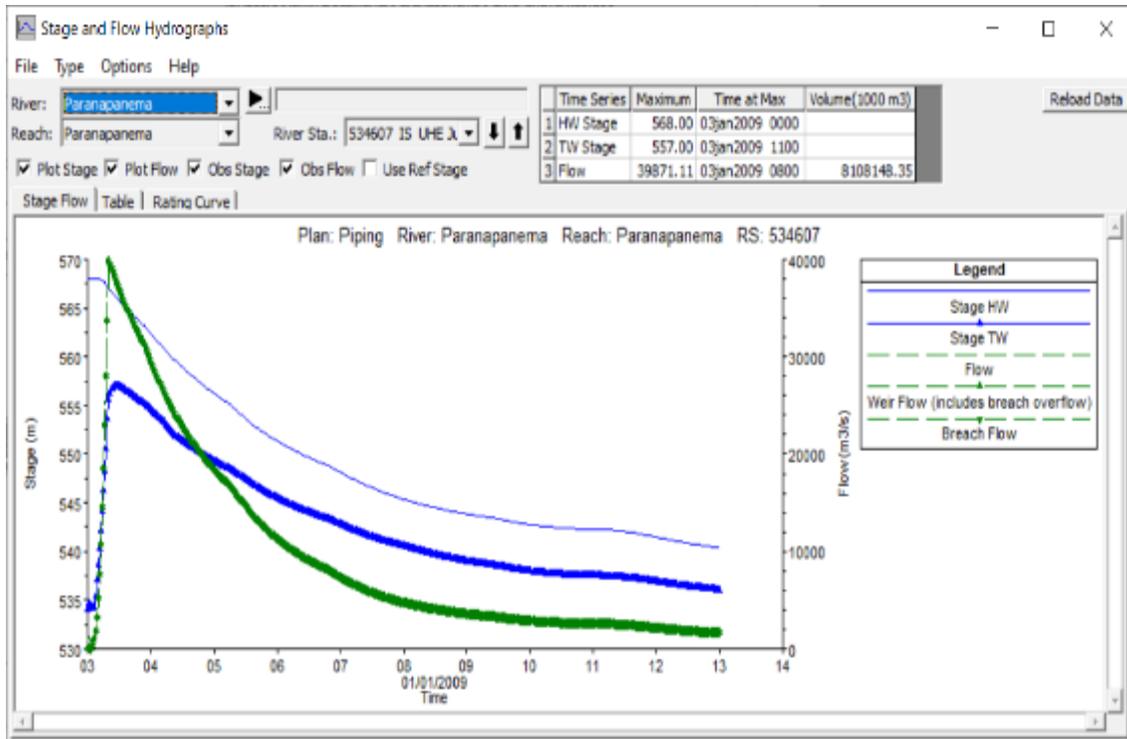


Figura 15: Hidrograma resultante del análisis en HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	7353.964537	39871.11	-82%	
Pierce (2008)	2	6215.732314	39871.11	-84%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	39871.11	437%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	39871.11	98%	
Bureau of reclamation (1982)	5	10848.60111	39871.11	-73%	
SCS (1981)	6	9428.627139	39871.11	-76%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	39871.11	-77%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	39871.11	98%	
Costa (1985)	9	486289.4272	39871.11	1120%	
Evans (1986)	10	125505.3961	39871.11	215%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	39871.11	-86%	
NRCS apud	12	9416.097294	39871.11	-76%	
Froehlich (1995b)	13	35211.55138	39871.11	-12%	0-20%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	56233.76422	39871.11	41%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	182756.967	39871.11	358%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	39871.11	567%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	39871.11	781%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	11359.88572	39871.11	-72%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066	39871.11	-31%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	39871.11	49%	0-50%
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	39871.11	575%	
Mohamed e.t.	22	47613.59201	39871.11	19%	0-20%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	39871.11	-84%	
Xu and Zhang (2009)	24	149559.481	39871.11	275%	
Macchione	25	9942.60	39871.11	-75%	
Macchione	26	10512.58039	39871.11	-74%	

Tabla 40: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión

Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

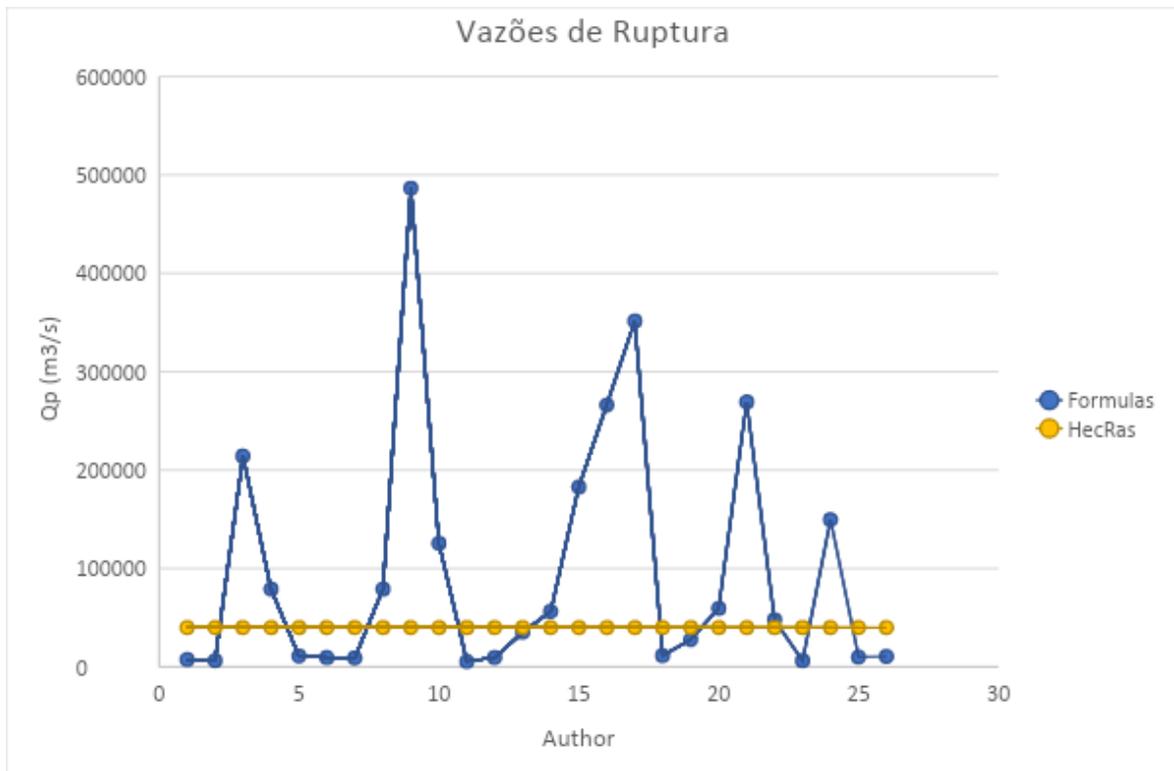


Figura 16: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por lo tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleira espesa (Singh, 1996) con 50%
- Costa (1985) con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) con 50%
- Froehlich (1995b) con 20%
- Mohamed e.t. con 20%

12.1.5. Caso 10

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada utilizados

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	569.5	hw (dam)	30.82
b	92.76	C1*	1.7
B	364.07	C2*	1.35
m	4.33	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	30.82		0.05
hdam	31.32	α₁	1.704894914
h min op	21.02	β₁	0.5
Breach base level	538.68	α₁	1
Nivel da base da barragem	538.68	α₂	4
Borda livre	0.5	Bd	6
Ab (m2)	6971.810692	Veroded (m3)	94674.85395
Abrecha	7153.9578	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.798
Y	10.7204157	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	5737.299401	B5	-2.458
angulo	1.343828816	rad	76.99553951

Tabla 41: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada, podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)
Pierce (2008)	1	7353.964537	39871.11
Pierce (2008)	2	6215.732314	39871.11
Pierce (2008)	3	214212.7318	39871.11
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	39871.11
Bureau of reclamation (1982)	5	10848.60111	39871.11
SCS (1981)	6	9428.627139	39871.11
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	39871.11
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	39871.11
Costa (1985)	9	486289.4272	39871.11
Evans (1986)	10	125505.3961	39871.11
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	39871.11
NRCS apud	12	9416.097294	39871.11
Froehlich (1995b)	13	35211.55138	39871.11
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	56233.76422	39871.11
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	182756.967	39871.11
Hagen (1982)	16	266045.2368	39871.11
Hagen (1982)	17	351436.0474	39871.11
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	11359.88572	39871.11
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066	39871.11
Costa (1985)	20	59350.01853	39871.11
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228	39871.11
Mohamed e.t.	22	47613.59201	39871.11
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	39871.11
Xu and Zhang (2009)	24	149559.481	39871.11
Macchione	25	9942.60	39871.11
Macchione	26	10512.58039	39871.11

Tabla 42: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		10
Descrição		JOS1b.not.ext
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		25
Final Bottom Elevation		533
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.27
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		569.5
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	1000
	06/jan	1500
	07/jan	2000
	08/jan	2500
	09/jan	3000
	10/jan	3800
Maximum Flow (m3/s)		39871.11
Data		03/jan

Tabla 43: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante

Fuente: Autor

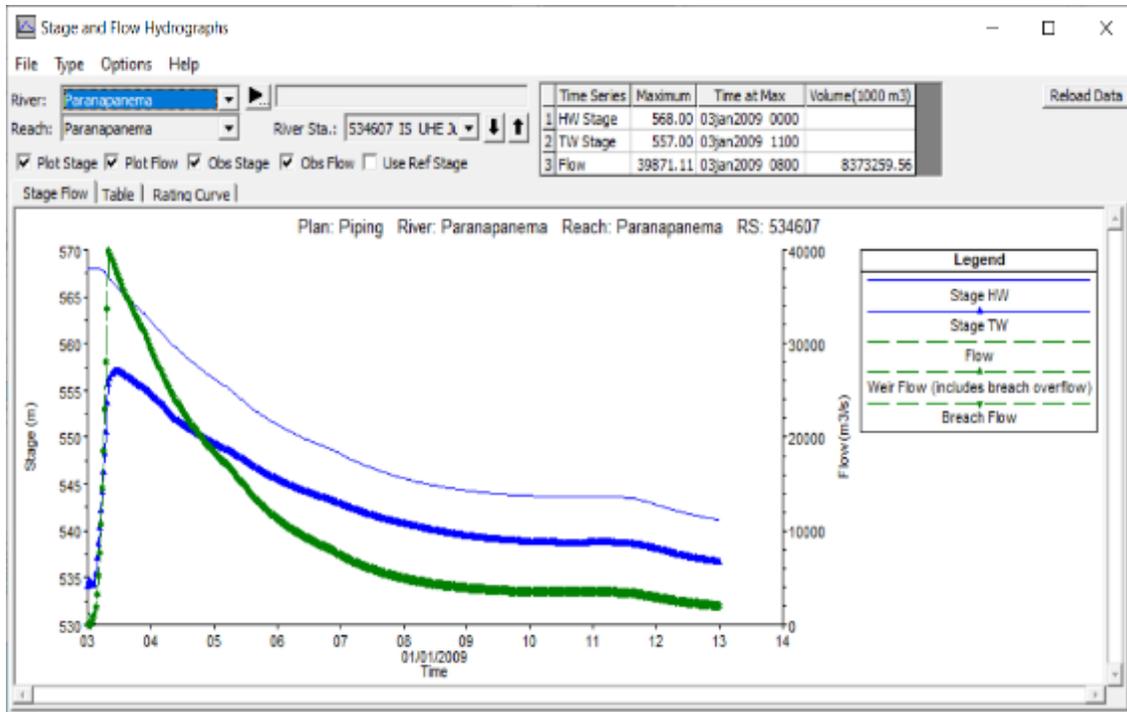


Figura 17: Hidrograma resultante del análisis en HecRAS
Fuente: Software HecRAS

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRAS. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	7353.964537	39871.11	-82%	
Pierce (2008)	2	6215.732314	39871.11	-84%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	39871.11	437%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	39871.11	98%	
Bureau of reclamation (1982)	5	10848.60111	39871.11	-73%	
SCS (1981)	6	9428.627139	39871.11	-76%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	39871.11	-77%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	39871.11	98%	
Costa (1985)	9	486289.4272	39871.11	1120%	
Evans (1986)	10	125505.3961	39871.11	215%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	39871.11	-86%	
NRCS apud	12	9416.097294	39871.11	-76%	
Froehlich (1995b)	13	35211.55138	39871.11	-12%	0-20%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	56233.76422	39871.11	41%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	182756.967	39871.11	358%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	39871.11	567%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	39871.11	781%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	11359.88572	39871.11	-72%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066	39871.11	-31%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	39871.11	49%	0-50%
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	39871.11	575%	
Mohamed e.t.	22	47613.59201	39871.11	19%	0-20%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	39871.11	-84%	
Xu and Zhang (2009)	24	149559.481	39871.11	275%	
Macchione	25	9942.60	39871.11	-75%	
Macchione	26	10512.58039	39871.11	-74%	

Tabla 44: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

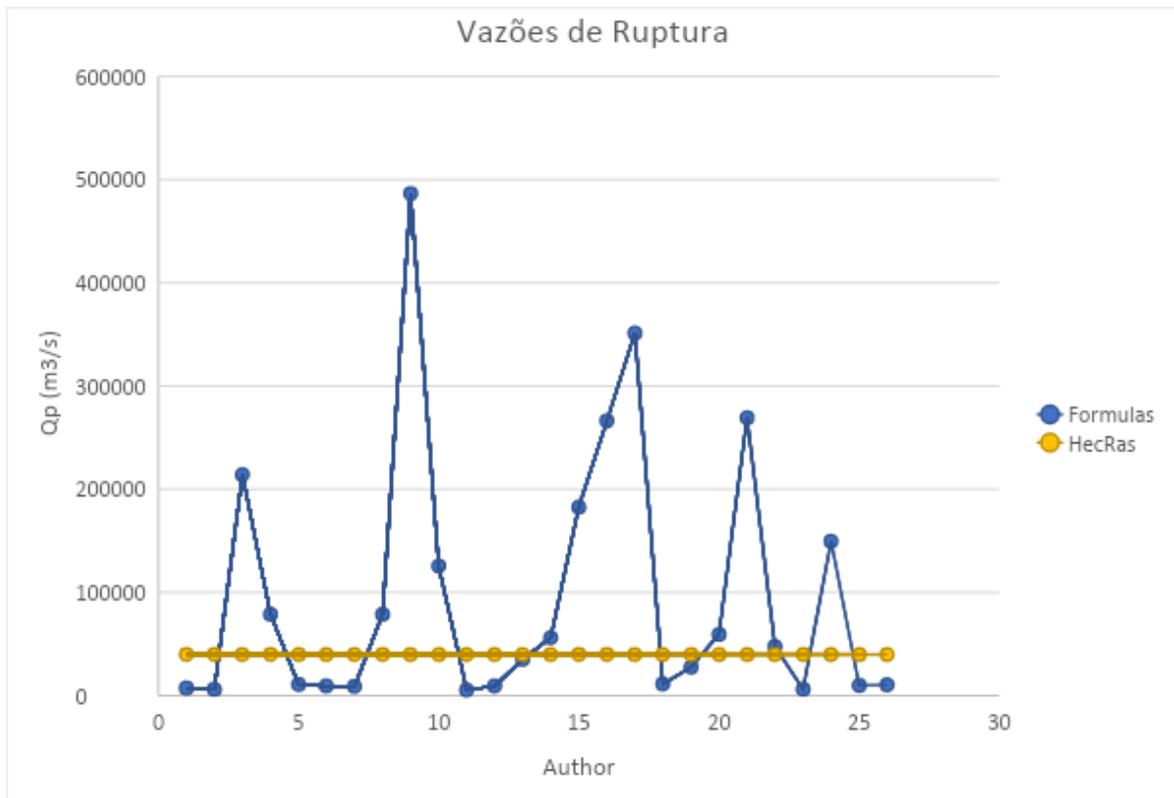


Figura 18: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleira espesa (Singh, 1996) con 50%
- Costa (1985) con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) con 50%
- Froehlich (1995b) con 20%
- Mohamed e.t. con 20%

12.1.6. Caso 11

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada utilizados

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	569.5	hw (dam)	30.82
b	92.76	C1*	1.7
B	364.07	C2*	1.35
m	4.33	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	30.82		0.05
hdam	31.32	α₁	1.704894914
h min op	21.02	β₁	0.5
Breach base level	538.68	α₁	1
Nivel da base da barragem	538.68	α₂	4
Borda livre	0.5	Bd	6
Ab (m2)	6971.810692	Veroded (m3)	94674.85395
Abrecha	7153.9578	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.798
Y	10.7204157	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	5737.299401	B5	-2.458
angulo	1.343828816	rad	76.99553951

Tabla 45: Datos de la represa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	7353.964537
Pierce (2008)	2	6215.732314
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	10848.60111
SCS (1981)	6	9428.627139
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	9416.097294
Froehlich (1995b)	13	35211.55138
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	56233.76422
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	182756.967
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	11359.88572
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228
Mohamed e. t.	22	47613.59201
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	149559.481
Macchione	25	9942.60
Macchione	26	10512.58039

Tabla 46: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		11
Descrição		JOS1c.not
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		25
Final Bottom Elevation		533
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.27
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568.01
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		569.5
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	1000
	06/jan	1200
	07/jan	1500
	08/jan	1800
	09/jan	2000
	10/jan	2500
Maximum Flow (m3/s)		39593.72
Data		11/jan

Tabla 47: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante

Fuente: Autor

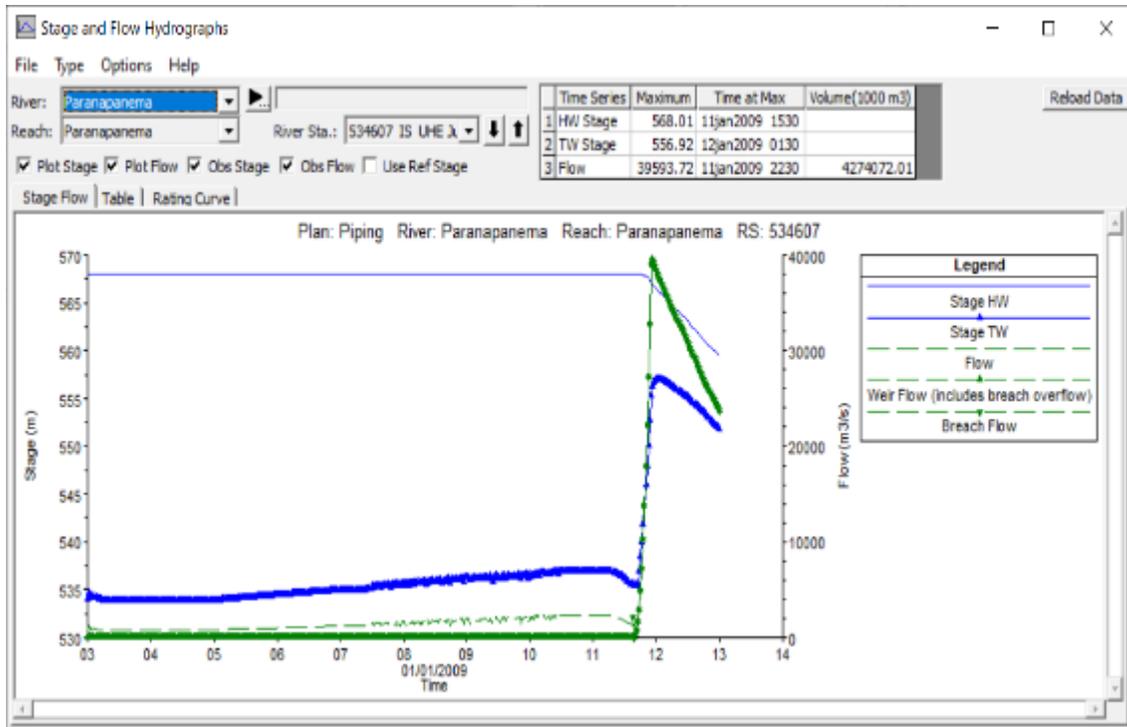


Figura 19: Hidrograma resultante del análisis en HecRAS

Fuente: Software HecRAS

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRAS. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	7353.964537	39593.72	-81%	
Pierce (2008)	2	6215.732314	39593.72	-84%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	39593.72	441%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	39593.72	99%	
Bureau of reclamation (1982)	5	10848.60111	39593.72	-73%	
SCS (1981)	6	9428.627139	39593.72	-76%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	39593.72	-77%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	39593.72	99%	
Costa (1985)	9	486289.4272	39593.72	1128%	
Evans (1986)	10	125505.3961	39593.72	217%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	39593.72	-86%	
NRCS apud	12	9416.097294	39593.72	-76%	
Froehlich (1995b)	13	35211.55138	39593.72	-11%	0-20%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	56233.76422	39593.72	42%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	182756.967	39593.72	362%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	39593.72	572%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	39593.72	788%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	11359.88572	39593.72	-71%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066	39593.72	-30%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	39593.72	50%	0-50%
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	39593.72	580%	
Mohamed e.t.	22	47613.59201	39593.72	20%	0-50%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	39593.72	-84%	
Xu and Zhang (2009)	24	149559.481	39593.72	278%	
Macchione	25	9942.60	39593.72	-75%	
Macchione	26	10512.58039	39593.72	-73%	

Tabla 48: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.

Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.



Figura 20: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleira espesa (Singh, 1996) con 50%
- Costa (1985) con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) con 50%
- Mohamed e.t. con 50%
- Froehlich (1995b) con 20%

12.1.7. Caso 12

No fue posible analizarlo porque estaba inestable en el software HecRas el 08/01, cuando se ingresaron los siguientes datos de entrada.

Simulação		12
Descrição		JOS1c.not.ext
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		25
Final Bottom Elevation		533
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.17
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568.01
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		568
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	1000
	06/jan	1500
	07/jan	2000
	08/jan	2500
	09/jan	3000
	10/jan	3800
Maximum Flow (m3/s)		Simulation went unstable
Data		08/jan

Tabla 49: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante
Fuente: Autor

12.1.8. Caso 13

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada utilizados

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568	hw (dam)	29.32
b	66.7	C1*	1.7
B	354.32	C2*	1.35
m	4.59	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	29.32		0.05
hdam	31.32	α1	1.704894914
h min op	21.02	β1	0.5
Breach base level	538.68	α1	1
Nivel da base da barragem	538.68	α2	4
Borda livre	2	Bd	6
Ab (m2)	5901.494416	Veroded (m3)	87253.47944
Abrecha	6593.1732	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.798
Y	7.276949891	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	5906.64447	B5	-2.458
angulo	1.356283441	rad	77.70913528

Tabla 50: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos

Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m ³)
Pierce (2008)	1	6437.385596
Pierce (2008)	2	5658.615823
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143
SCS (1981)	6	8597.287004
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	8585.86194
Froehlich (1995b)	13	33099.08675
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	7816.482929
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	19875.01135
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	31768.23141
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	140348.5939
Macchione	25	13275.06
Macchione	26	19504.7781

Tabla 51: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		13
Descrição		JOS2a.ed
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		68
Final Bottom Elevation		538.68
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.17
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		568
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	800
	06/jan	800
	07/jan	800
	08/jan	800
	09/jan	800
	10/jan	800
Maximum Flow (m3/s)		34580.75
Data		03/jan

Tabla 52: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante

Fuente: Autor

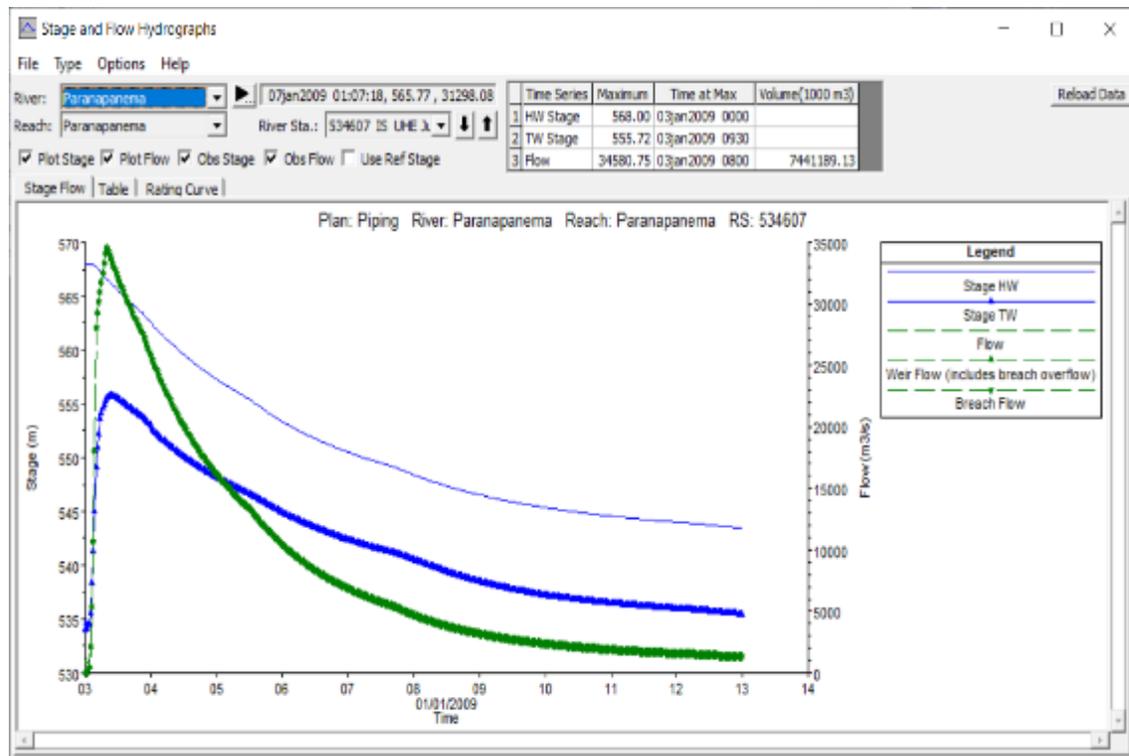


Figura 21: Hidrograma resultante del análisis en HecRas

Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6437.385596	34580.75	-81%	
Pierce (2008)	2	5658.615823	34580.75	-84%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	34580.75	519%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	34580.75	128%	
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143	34580.75	-71%	
SCS (1981)	6	8597.287004	34580.75	-75%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	34580.75	-74%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	34580.75	128%	
Costa (1985)	9	486289.4272	34580.75	1306%	
Evans (1986)	10	125505.3961	34580.75	263%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	34580.75	-84%	
NRCS apud	12	8585.86194	34580.75	-75%	
Froehlich (1995b)	13	33099.08675	34580.75	-4%	0-10%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574	34580.75	59%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414	34580.75	418%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	34580.75	669%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	34580.75	916%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	7816.482929	34580.75	-77%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	19875.01135	34580.75	-43%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	34580.75	72%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	34580.75	678%	
Mohamed e.t.	22	31768.23141	34580.75	-8%	0-10%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	34580.75	-82%	
Xu and Zhang (2009)	24	140348.5939	34580.75	306%	
Macchione	25	13275.06	34580.75	-62%	
Macchione	26	19504.7781	34580.75	-44%	0-50%

Tabla 53: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión

Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

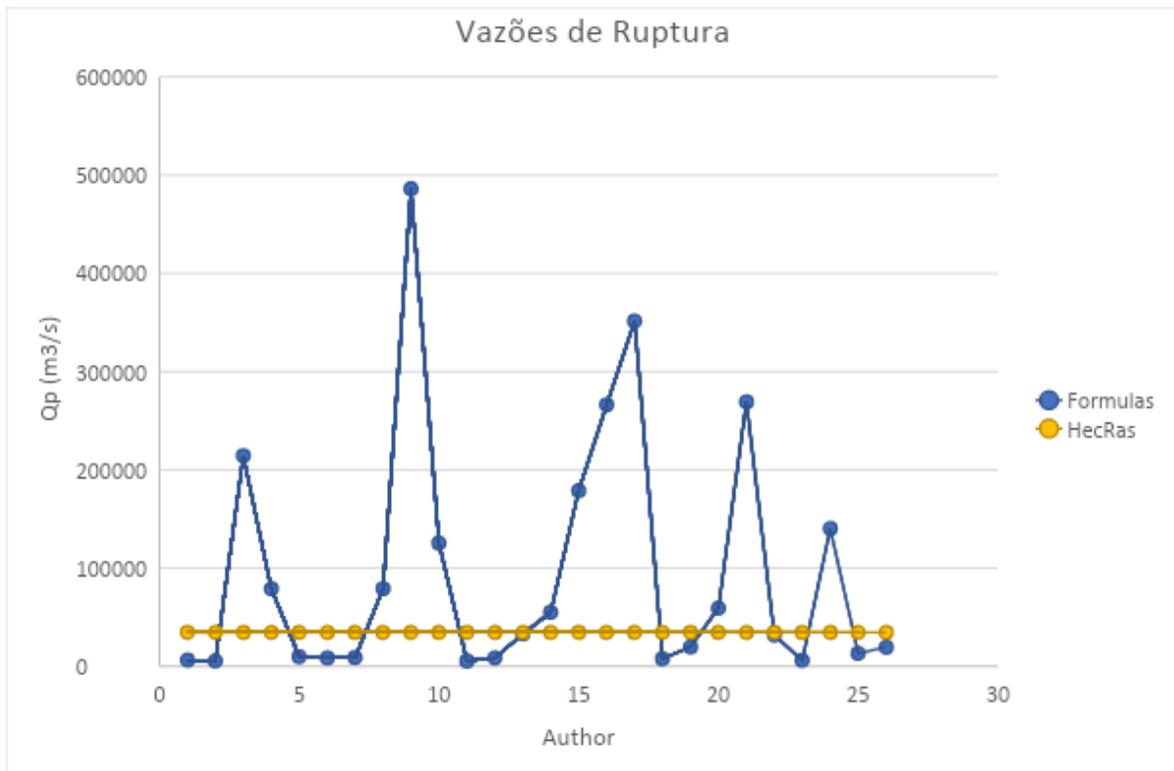


Figura 22: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleira espesa (Singh, 1996) con 50%
- Macchione con 50%
- Froehlich (1995b) con 10%
- Mohamed e.t. con un 10%

12.1.9. Caso 14

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada utilizados

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568	hw (dam)	29.32
b	92.76	C1*	1.7
B	364.07	C2*	1.35
m	4.33	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	29.32		0.05
hdam	31.32	α1	1.704894914
h min op	21.02	β1	0.5
Breach base level	538.68	α1	1
Nivel da base da barragem	538.68	α2	4
Borda livre	2	Bd	6
Ab (m2)	6442.061392	Veroded (m3)	94674.85395
Abrecha	7153.9578	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.798
Y	10.7204157	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	5737.299401	B5	-2.458
angulo	1.343828816	rad	76.99553951

Tabla 54: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m ³)
Pierce (2008)	1	6437.385596
Pierce (2008)	2	5658.615823
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143
SCS (1981)	6	8597.287004
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	8585.86194
Froehlich (1995b)	13	33099.08675
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	10870.41914
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	44180.22707
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	140348.5939
Macchione	25	8190.12
Macchione	26	7807.685695

Tabla 55: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		14
Descrição		JOS2b.ed
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		25
Final Bottom Elevation		533
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.17
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		568
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	1000
	06/jan	1200
	07/jan	1500
	08/jan	1800
	09/jan	2000
	10/jan	2500
Maximum Flow (m3/s)		34580.75
Data		03/jan

Tabla 56: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante

Fuente: Autor

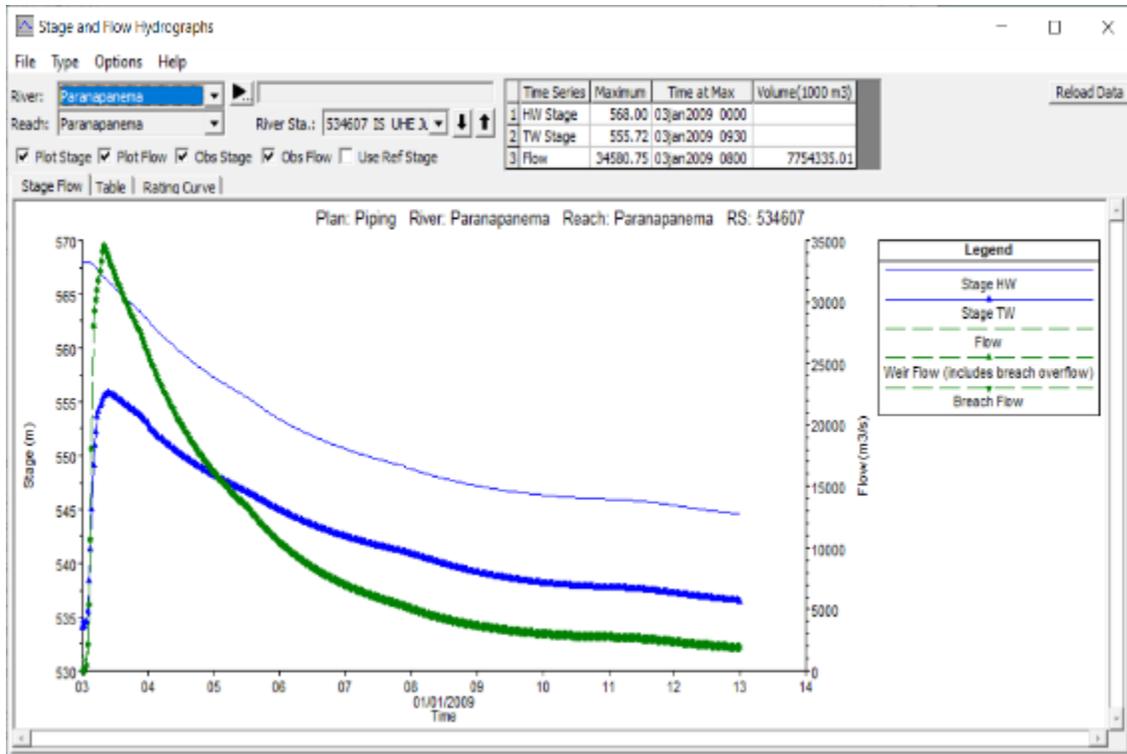


Figura 23: Hidrograma resultante del análisis en HecRas

Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6437.385596	34580.75	-81%	
Pierce (2008)	2	5658.615823	34580.75	-84%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	34580.75	519%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	34580.75	128%	
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143	34580.75	-71%	
SCS (1981)	6	8597.287004	34580.75	-75%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	34580.75	-74%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	34580.75	128%	
Costa (1985)	9	486289.4272	34580.75	1306%	
Evans (1986)	10	125505.3961	34580.75	263%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	34580.75	-84%	
NRCS apud	12	8585.86194	34580.75	-75%	
Froehlich (1995b)	13	33099.08675	34580.75	-4%	0-10%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574	34580.75	59%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414	34580.75	418%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	34580.75	669%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	34580.75	916%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	10870.41914	34580.75	-69%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066	34580.75	-20%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	34580.75	72%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	34580.75	678%	
Mohamed e.t.	22	44180.22707	34580.75	28%	0-50%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	34580.75	-82%	
Xu and Zhang (2009)	24	140348.5939	34580.75	306%	
Macchione	25	8190.12	34580.75	-76%	
Macchione	26	7807.685695	34580.75	-77%	

Tabla 57: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.

Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.



Figura 24: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de Soleira espesa (Singh, 1996) con 50%
- Mohamed e.t. con 50%
- Froehlich (1995b) con 10%

12.1.10. Caso 15

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada utilizados

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568.01	hw (dam)	29.33
b	66.7	C1*	1.7
B	354.32	C2*	1.35
m	4.59	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	29.33		0.05
hdam	31.32	α1	1.704894914
h min op	21.02	β1	0.5
Breach base level	538.68	α1	1
Nivel da base da barragem	538.68	α2	4
Borda livre	1.99	Bd	6
Ab (m2)	5904.853451	Veroded (m3)	87253.47944
Abrecha	6593.1732	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.798
Y	7.276949891	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	5906.64447	B5	-2.458
angulo	1.356283441	rad	77.70913528

Tabla 58: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada, podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	6443.245019
Pierce (2008)	2	5662.27527
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	9898.301627
SCS (1981)	6	8602.712409
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	8591.280134
Froehlich (1995b)	13	33113.08557
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55097.34606
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179072.5373
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	7818.812152
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	19875.01135
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	31784.4853
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	140409.5804
Macchione	25	13290.12
Macchione	26	19530.15526

Tabla 59: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		15
Descrição		JOS2c.ed
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		68
Final Bottom Elevation		538.68
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.17
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568.01
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		568.01
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	1000
	06/jan	1200
	07/jan	1500
	08/jan	1800
	09/jan	2000
	10/jan	2500
Maximum Flow (m3/s)		34686.71
Data		11/jan

Tabla 60: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante

Fuente: Autor

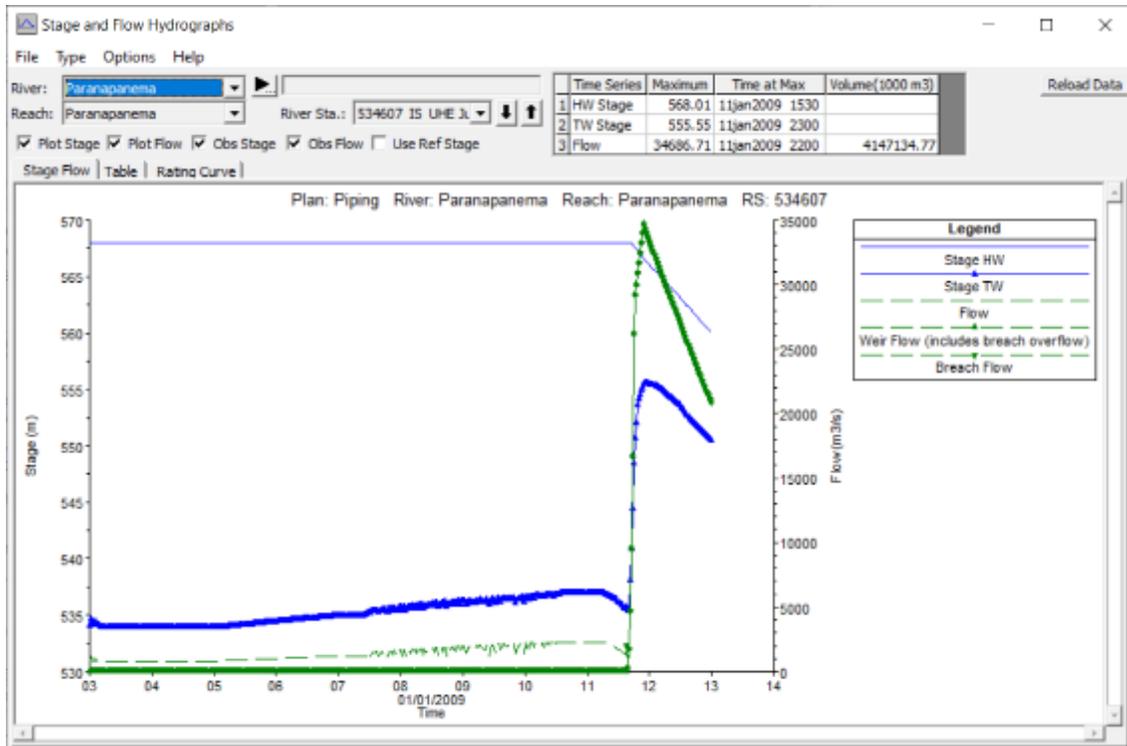


Figura 25: Hidrograma resultante del análisis en HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6443.245019	34686.71	-81%	
Pierce (2008)	2	5662.27527	34686.71	-84%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	34686.71	518%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	34686.71	128%	
Bureau of reclamation (1982)	5	9898.301627	34686.71	-71%	
SCS (1981)	6	8602.712409	34686.71	-75%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	34686.71	-74%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	34686.71	128%	
Costa (1985)	9	486289.4272	34686.71	1302%	
Evans (1986)	10	125505.3961	34686.71	262%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	34686.71	-84%	
NRCS apud	12	8591.280134	34686.71	-75%	
Froehlich (1995b)	13	33113.08557	34686.71	-5%	0-10%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55097.34606	34686.71	59%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179072.5373	34686.71	416%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	34686.71	667%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	34686.71	913%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	7818.812152	34686.71	-77%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	19875.01135	34686.71	-43%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	34686.71	71%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	34686.71	676%	
Mohamed e.t.	22	31784.4853	34686.71	-8%	0-10%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	34686.71	-82%	
Xu and Zhang (2009)	24	140409.5804	34686.71	305%	
Macchione	25	13290.12	34686.71	-62%	
Macchione	26	19530.15526	34686.71	-44%	0-50%

Tabla 61: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

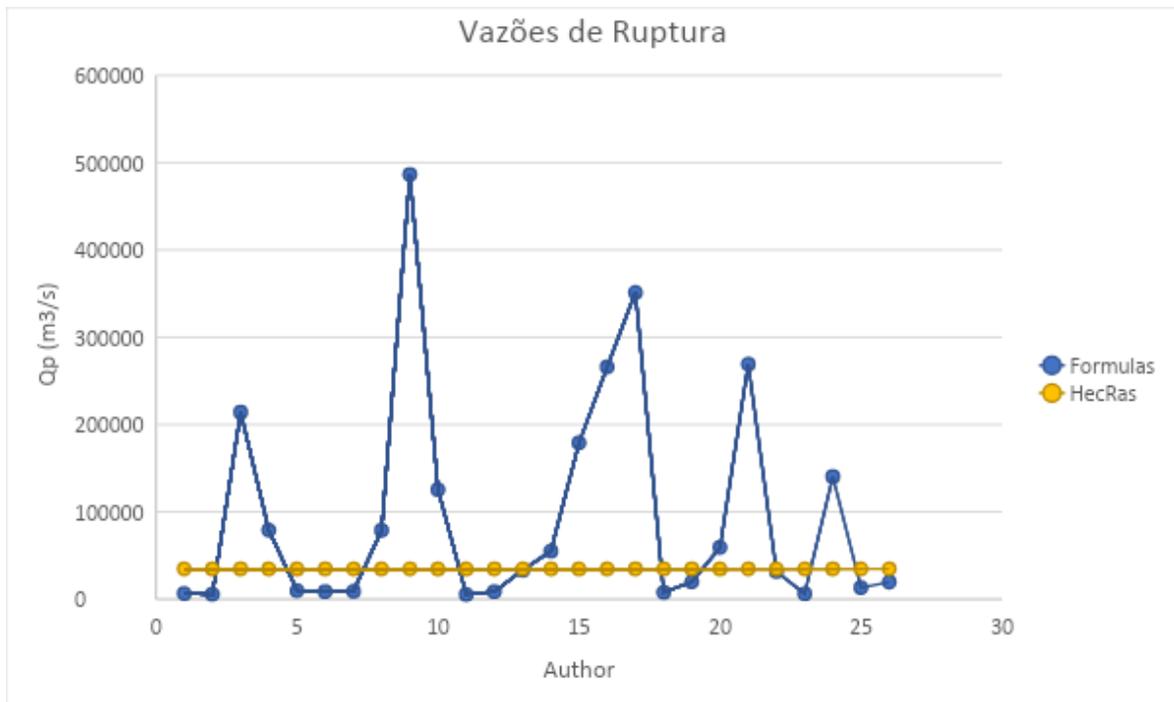


Figura 26: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleira espesa (Singh, 1996) con 50%
- Macchione con 50%
- Froehlich (1995b) con 10%
- Mohamed e.t. con un 10%

12.1.11. Caso 16

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada utilizados

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568	hw (dam)	29.32
b	260	C1*	1.7
B	524	C2*	1.35
m	8	Tr (h)	1
hbrecha	16.5	hr	15
hw (breach)	14.50		0.05
hdam	31.32	α₁	1.704894914
h min op	21.02	β₁	0.5
Breach base level	553.5	α₁	1
Nivel da base da barragem	538.68	α₂	4
Borda livre	2	Bd	6
Ab (m2)	5452	Veroded (m3)	52810.8672
Abrecha	6468	T(s)	360
Bt	13.32	B2	0.798
Y	1.43	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	7801.76903	B5	-2.458
angulo	1.446441332	rad	82.87478985

Tabla 62: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m ³)
Pierce (2008)	1	6437.385596
Pierce (2008)	2	5658.615823
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	2688.835116
SCS (1981)	6	2336.893347
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	2333.787814
Froehlich (1995b)	13	13823.85011
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	41217.50765
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	134055.914
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	30469.0489
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	29624.30604
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	43067.19691
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	3641.540116
Xu and Zhang (2009)	24	57230.03455
Macchione	25	41663.50
Macchione	26	72496.3171

Tabla 63: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		16
Descrição		JOS3a.ed
Parametro		Valor
Center Station of the breach		1110
Final Bottom Longitudinal Width		260
Final Bottom Elevation		553.5
Left Side Slope		8
Right Side Slope		8
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.17
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		568
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	800
	06/jan	800
	07/jan	800
	08/jan	800
	09/jan	800
	10/jan	800
Maximum Flow (m3/s)		24720.95
Data		03/jan

Tabla 64: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante

Fuente: Autor

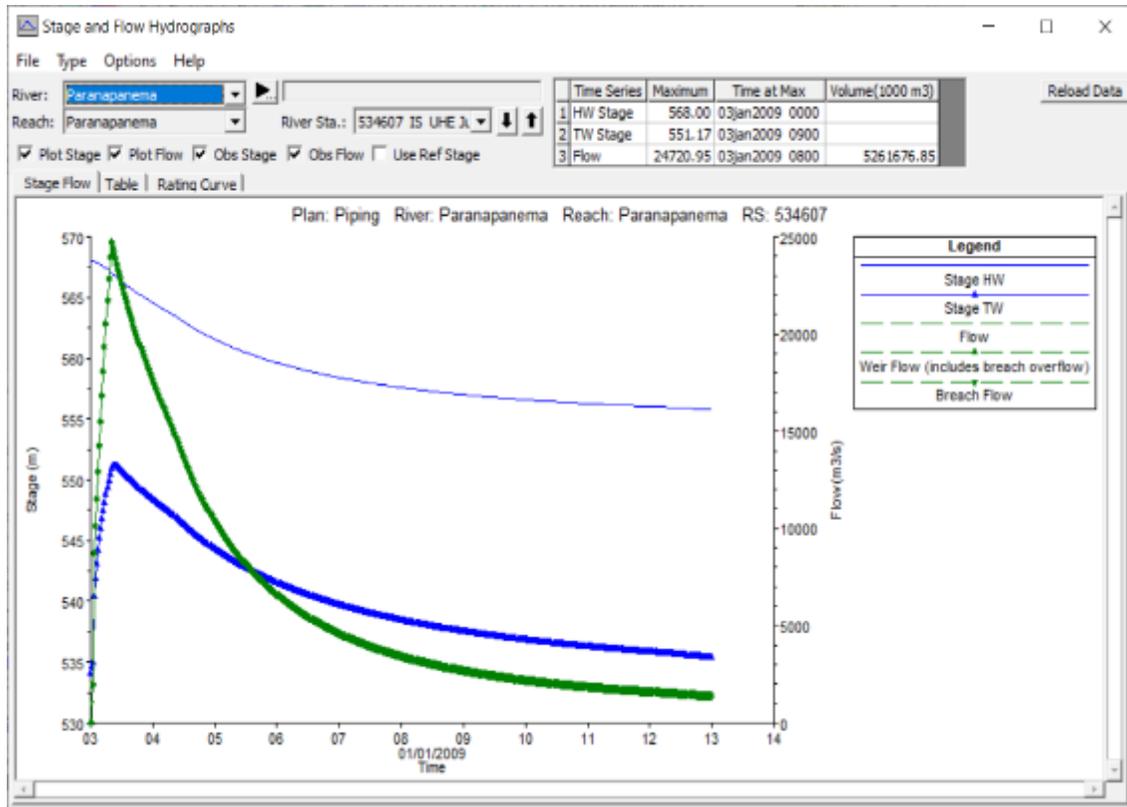


Figura 27: Hidrograma resultante del análisis HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6437.385596	24720.95	-74%	
Pierce (2008)	2	5658.615823	24720.95	-77%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	24720.95	767%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	24720.95	219%	
Bureau of reclamation (1982)	5	2688.835116	24720.95	-89%	
SCS (1981)	6	2336.893347	24720.95	-91%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	24720.95	-64%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	24720.95	219%	
Costa (1985)	9	486289.4272	24720.95	1867%	
Evans (1986)	10	125505.3961	24720.95	408%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	24720.95	-78%	
NRCS apud	12	2333.787814	24720.95	-91%	
Froehlich (1995b)	13	13823.85011	24720.95	-44%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	41217.50765	24720.95	67%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	134055.914	24720.95	442%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	24720.95	976%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	24720.95	1322%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	30469.0489	24720.95	23%	0-50%
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	29624.30604	24720.95	20%	0-20%
Costa (1985)	20	59350.01853	24720.95	140%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	24720.95	989%	
Mohamed e.t.	22	43067.19691	24720.95	74%	
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	3641.540116	24720.95	-85%	
Xu and Zhang (2009)	24	57230.03455	24720.95	132%	
Macchione	25	41663.50	24720.95	69%	
Macchione	26	72496.3171	24720.95	193%	

Tabla 65: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.

Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

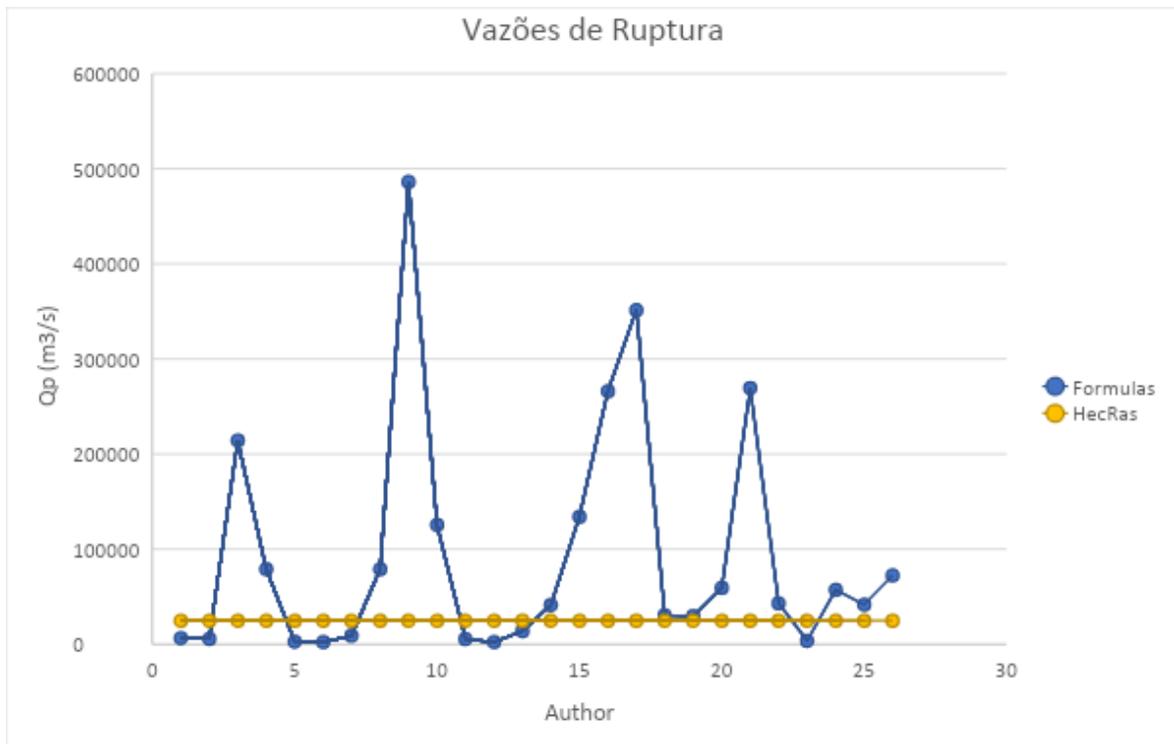


Figura 28: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Froehlich (1995b) con 50%
- Saint Venant apud US Army Corps of Engineers (1997) con 50%
- Cobertizo de suela gruesa (Singh, 1996) con 20%

12.1.12. Caso 17

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada utilizados

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568	hw (dam)	29.32
b	260	C1*	1.7
B	524	C2*	1.35
m	8	Tr (h)	1
hbrecha	16.5	hr	15
hw (breach)	14.50		0.05
hdam	31.32	α_1	1.704894914
h min op	21.02	β_1	0.5
Breach base level	553.5	α_1	1
Nivel da base da barragem	538.68	α_2	4
Borda livre	2	Bd	6
Ab (m2)	5452	Veroded (m3)	52810.8672
Abrecha	6468	T(s)	360
Bt	13.32	B2	0.798
Y	1.43	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	7801.76903	B5	-2.458
angulo	1.446441332	rad	82.87478985

Tabla 66: Datos de la represa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m ³)
Pierce (2008)	1	6437.385596
Pierce (2008)	2	5658.615823
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	2688.835116
SCS (1981)	6	2336.893347
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	2333.787814
Froehlich (1995b)	13	13823.85011
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	41217.50765
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	134055.914
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	30469.0489
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	29624.30604
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	43067.19691
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	3641.540116
Xu and Zhang (2009)	24	57230.03455
Macchione	25	41663.50
Macchione	26	72496.3171

Tabla 67: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		17
Descrição		JOS3b.ed
Parametro		Valor
Center Station of the breach		1110
Final Bottom Longitudinal Width		260
Final Bottom Elevation		553.5
Left Side Slope		8
Right Side Slope		8
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.17
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		568
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	1000
	06/jan	1200
	07/jan	1500
	08/jan	1800
	09/jan	2000
	10/jan	2500
Maximum Flow (m3/s)		24720.96
Data		03/jan

Tabla 68: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante

Fuente: Autor

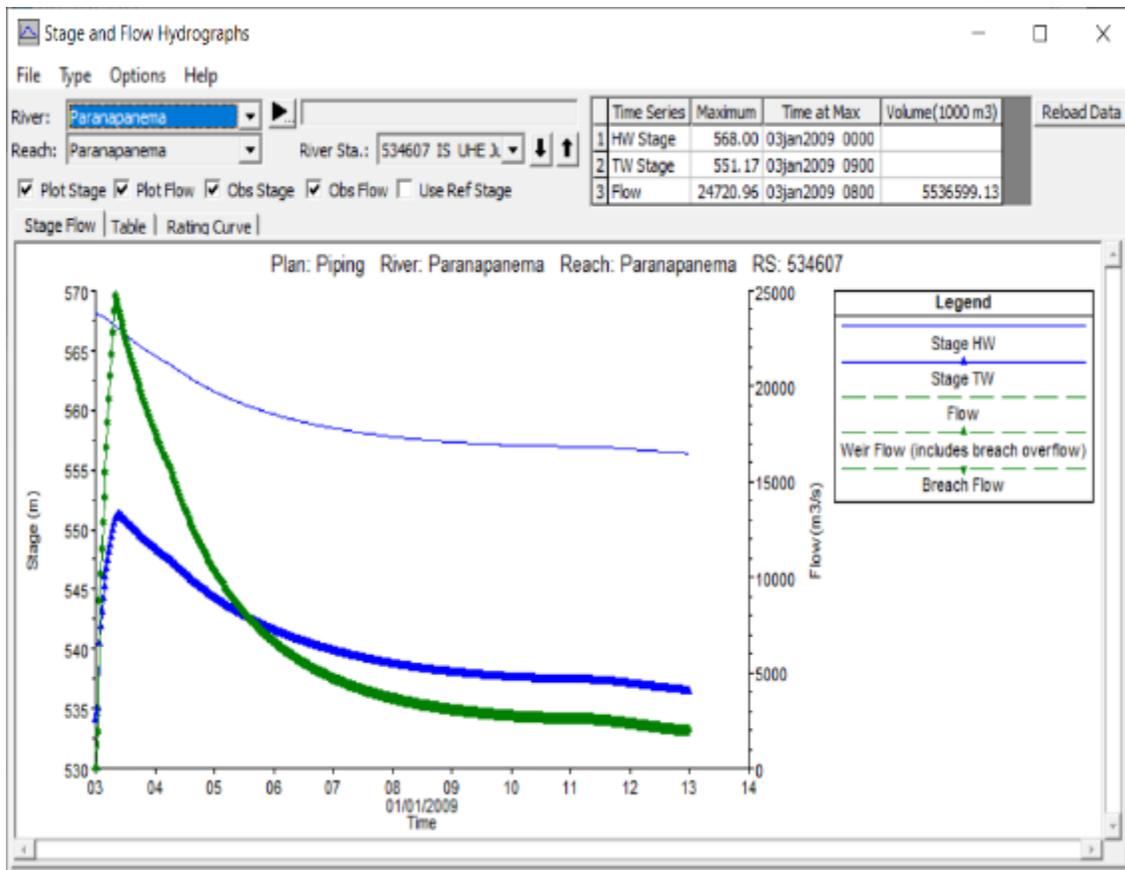


Figura 29: Hidrograma resultante del análisis en HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6437.385596	24720.96	-74%	
Pierce (2008)	2	5658.615823	24720.96	-77%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	24720.96	767%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	24720.96	219%	
Bureau of reclamation (1982)	5	2688.835116	24720.96	-89%	
SCS (1981)	6	2336.893347	24720.96	-91%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	24720.96	-64%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	24720.96	219%	
Costa (1985)	9	486289.4272	24720.96	1867%	
Evans (1986)	10	125505.3961	24720.96	408%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	24720.96	-78%	
NRCS apud	12	2333.787814	24720.96	-91%	
Froehlich (1995b)	13	13823.85011	24720.96	-44%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	41217.50765	24720.96	67%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	134055.914	24720.96	442%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	24720.96	976%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	24720.96	1322%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	30469.0489	24720.96	23%	0-50%
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	29624.30604	24720.96	20%	0-20%
Costa (1985)	20	59350.01853	24720.96	140%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	24720.96	989%	
Mohamed e.t.	22	43067.19691	24720.96	74%	
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	3641.540116	24720.96	-85%	
Xu and Zhang (2009)	24	57230.03455	24720.96	132%	
Macchione	25	41663.50	24720.96	69%	
Macchione	26	72496.3171	24720.96	193%	

Tabla 69: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.

Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

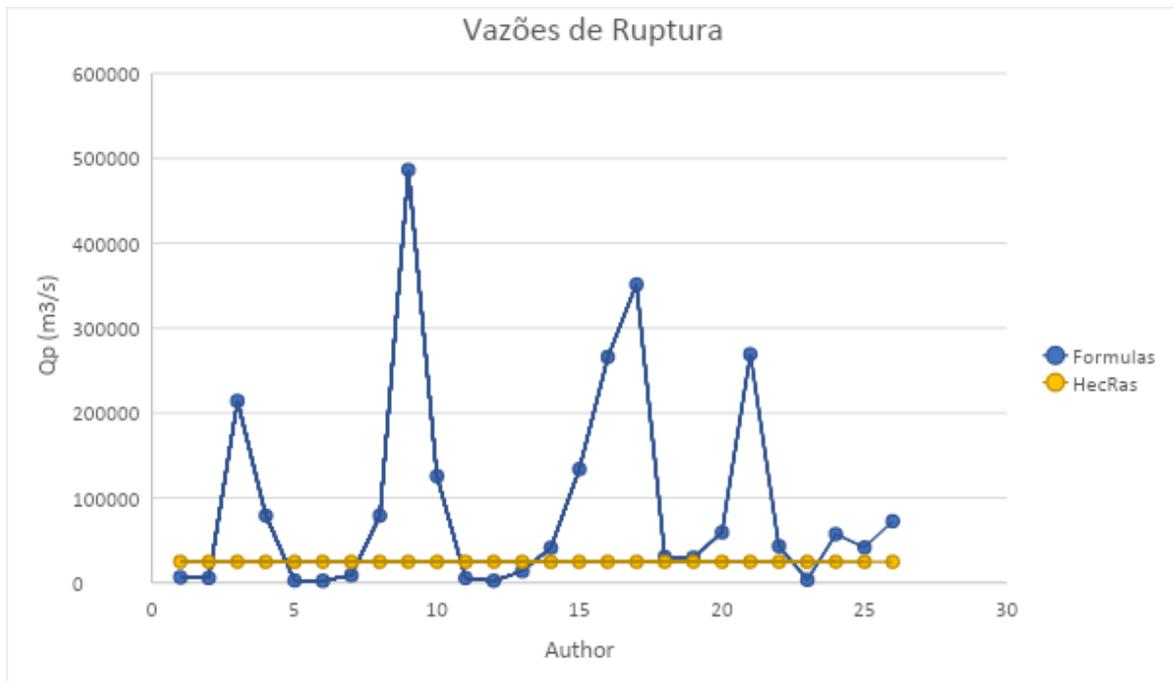


Figura 30: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Froehlich (1995b) con 50%
- Saint Venant apud US Army Corps of Engineers (1997) con 50%
- Vertedor de Soleira Espesa (Singh, 1996) con 20%

12.1.13. Caso 18

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568.01	hw (dam)	29.33
b	260	C1*	1.7
B	524	C2*	1.35
m	8	Tr (h)	1
hbrecha	16.5	hr	15
hw (breach)	14.51		0.05
hdam	31.32	α₁	1.704894914
h min op	21.02	β₁	0.5
Breach base level	553.5	α₁	1
Nivel da base da barragem	538.68	α₂	4
Borda livre	1.99	Bd	6
Ab (m2)	5456.9208	Veroded (m3)	52810.8672
Abrecha	6468	T(s)	360
Bt	13.32	B2	0.798
Y	1.43	B3	0.466
Ko	1.4	B4	-1.303
A6	7801.76903	B5	-2.458
angulo	1.446441332	rad	82.87478985

Tabla 70: Datos de la represa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m ³)
Pierce (2008)	1	6443.245019
Pierce (2008)	2	5662.27527
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	2692.266704
SCS (1981)	6	2339.875774
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	2336.766278
Froehlich (1995b)	13	13835.67286
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	41229.21673
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	134093.9042
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	30478.12833
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	29624.30604
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	43111.75687
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	3641.540116
Xu and Zhang (2009)	24	57280.32279
Macchione	25	41700.86
Macchione	26	72561.52434

Tabla 71: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		18
Descrição		JOS3c.ed
Parametro		Valor
Center Station of the breach		1110
Final Bottom Longitudinal Width		260
Final Bottom Elevation		553.5
Left Side Slope		8
Right Side Slope		8
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.17
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568.01
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		538.68
Pool Elevation at Failure		568.01
Pool Volume at Failure		7750000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		20.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	1000
	06/jan	1200
	07/jan	1500
	08/jan	1800
	09/jan	2000
	10/jan	2500
Maximum Flow (m3/s)		24837.65
Data		11/jan

Tabla 72: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante

Fuente: Autor

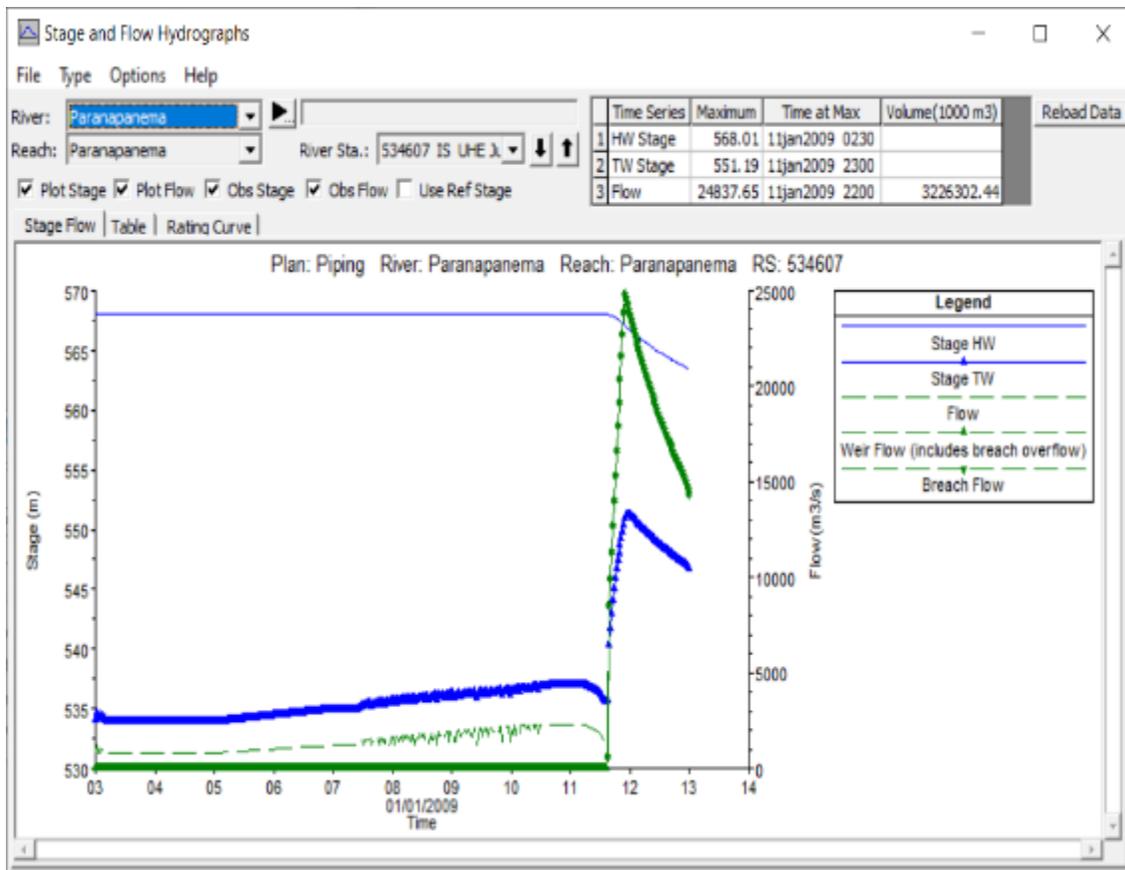


Figura 31: Hidrograma resultante del análisis en HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q- HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6443.245019	24837.65	-74%	
Pierce (2008)	2	5662.27527	24837.65	-77%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	24837.65	762%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	24837.65	218%	
Bureau of reclamation (1982)	5	2692.266704	24837.65	-89%	
SCS (1981)	6	2339.875774	24837.65	-91%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	24837.65	-64%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	24837.65	218%	
Costa (1985)	9	486289.4272	24837.65	1858%	
Evans (1986)	10	125505.3961	24837.65	405%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	24837.65	-78%	
NRCS apud	12	2336.766278	24837.65	-91%	
Froehlich (1995b)	13	13835.67286	24837.65	-44%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	41229.21673	24837.65	66%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	134093.9042	24837.65	440%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	24837.65	971%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	24837.65	1315%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	30478.12833	24837.65	23%	0-50%
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	29624.30604	24837.65	19%	0-20%
Costa (1985)	20	59350.01853	24837.65	139%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	24837.65	984%	
Mohamed e.t.	22	43111.75687	24837.65	74%	
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	3641.540116	24837.65	-85%	
Xu and Zhang (2009)	24	57280.32279	24837.65	131%	
Macchione	25	41700.86	24837.65	68%	
Macchione	26	72561.52434	24837.65	192%	

Tabla 73: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.



Figura 32: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Froehlich (1995b) con 50%
- Saint Venant apud US Army Corps of Engineers (1997) con 50%
- Vertedor de Soleira espesa (Singh, 1996) con 20%

12.2. Represa de Jurumirim con ruptura por Piping

12.2.1. Caso 1

- Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	11.32
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568	hw (dam)	29.32
b	92.76	C1*	1.7
B	364.07	C2*	1.35
m	4.33	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	29.32		0.05
hdam	31.32	α1	1.704894914
h min op	21.02	β1	0.5
Breach base level	538.68	α1	1
Nivel da base da barragem	538.68	α2	4
Borda livre	2	Bd	6
Ab (m2)	6442.061392	Veroded (m3)	94674.85395
Abrecha	7153.9578	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.26
Y	10.7204157	B3	-0.072
Ko	1	B4	-1.637
A6	5737.299401	B5	-2.49
angulo	1.343828816	rad	76.99553951

Tabla 74: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos. **Fuente:** Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	6437.385596
Pierce (2008)	2	5658.615823
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143
SCS (1981)	6	8597.287004
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	8585.86194
Froehlich (1995b)	13	33099.08675
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	10870.41914
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	44180.22707
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	100497.1415
Macchione	25	8190.12
Macchione	26	7807.685695
Mohamed.e.t.	27	118641.5164

Tabla 75: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		1
Descrição		JPS1
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		25
Final Bottom Elevation		533
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.35
Failure Mode		Piping
Piping Coefficient		0.5
Initial Piping Elevation		550
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		533
Pool Elevation at Failure		568
Pool Volume at Failure		7100000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		6.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		2.7
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	800
	06/jan	800
	07/jan	800
	08/jan	800
	09/jan	800
	10/jan	800
Maximum Flow (m3/s)		40557.49
Data		03/jan

Tabla 76: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante
Fuente: Autor

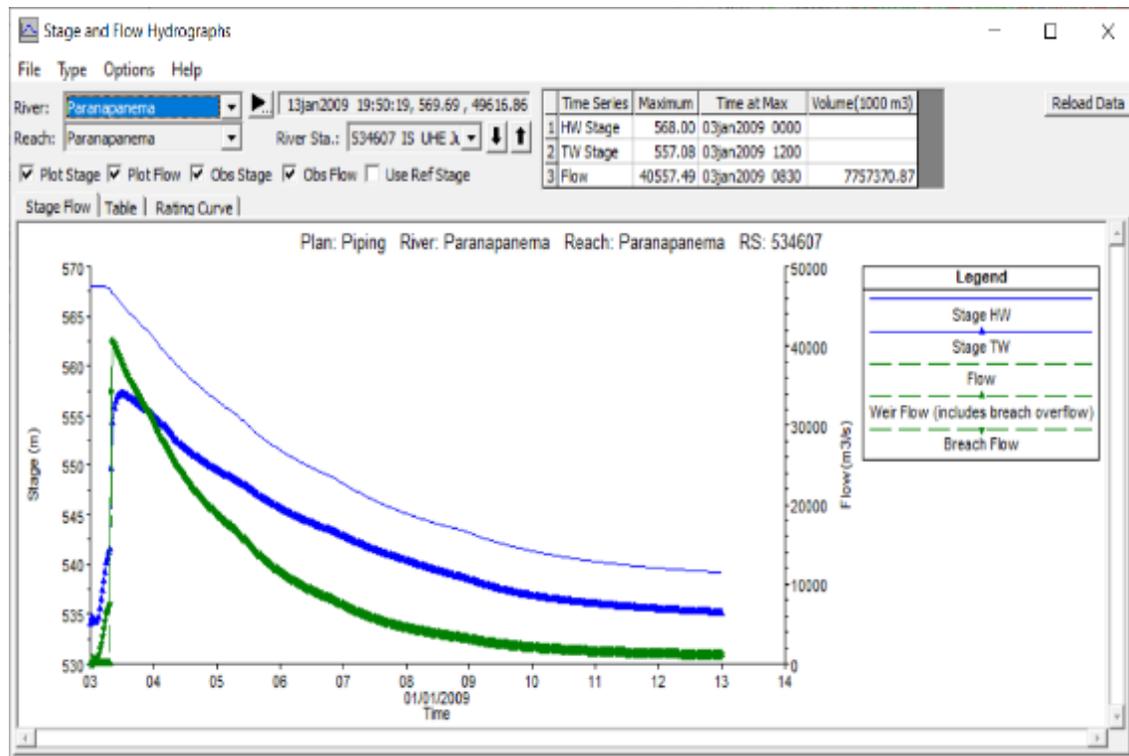


Figura 33: Hidrograma resultante del análisis en HecRas

Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6437.385596	40557.49	-84%	
Pierce (2008)	2	5658.615823	40557.49	-86%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	40557.49	428%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	40557.49	95%	
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143	40557.49	-76%	
SCS (1981)	6	8597.287004	40557.49	-79%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	40557.49	-78%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	40557.49	95%	
Costa (1985)	9	486289.4272	40557.49	1099%	
Evans (1986)	10	125505.3961	40557.49	209%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	40557.49	-86%	
NRCS apud	12	8585.86194	40557.49	-79%	
Froehlich (1995b)	13	33099.08675	40557.49	-18%	0-20%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574	40557.49	36%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414	40557.49	341%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	40557.49	556%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	40557.49	767%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	10870.41914	40557.49	-73%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066	40557.49	-32%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	40557.49	46%	0-50%
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	40557.49	564%	
Mohamed e.t.	22	44180.22707	40557.49	9%	0-10%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	40557.49	-85%	
Xu and Zhang (2009)	24	100497.1415	40557.49	148%	
Macchione	25	8190.12	40557.49	-80%	
Macchione	26	7807.685695	40557.49	-81%	
Mohamed.e.t.	27	118641.5164	40557.49	193%	

Tabla 77: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.



Figura 34: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleiro espesa (Singh, 1996) con 0 - 50%
- Costa (1985) con 0 - 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) con 0 - 50%
- Froehlich (1995b) con 0-20%
- Mohamed e.t. con 0 - 10%

12.2.2. Caso 2

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	11.32
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568	hw (dam)	29.32
b	66.7	C1*	1.7
B	354.32	C2*	1.35
m	4.59	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	29.32		0.05
hdam	31.32	α_1	1.704894914
h min op	21.02	β_1	0.5
Breach base level	538.68	α_1	1
Nivel da base da barragem	538.68	α_2	4
Borda livre	2	Bd	6
Ab (m2)	5901.494416	Veroded (m3)	87253.47944
Abrecha	6593.1732	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.26
Y	7.276949891	B3	-0.072
Ko	1	B4	-1.637
A6	5906.64447	B5	-2.49
angulo	1.356283441	rad	77.70913528

Tabla 78: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada, podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	6437.385596
Pierce (2008)	2	5658.615823
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143
SCS (1981)	6	8597.287004
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	8585.86194
Froehlich (1995b)	13	33099.08675
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	7816.482929
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	19875.01135
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	31768.23141
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	100497.1415
Macchione	25	13275.06
Macchione	26	19504.7781
Mohamed.e.t.	27	108686.0562

Tabla 79: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		2
Descrição		JPS2
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		68
Final Bottom Elevation		538.68
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.35
Failure Mode		Piping
Piping Coefficient		0.5
Initial Piping Elevation		550
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		533
Pool Elevation at Failure		568
Pool Volume at Failure		7100000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		6.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		2.7
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	800
	06/jan	800
	07/jan	800
	08/jan	800
	09/jan	800
	10/jan	800
Maximum Flow (m3/s)		35339.8
Data		03/jan

Tabla 80: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante
Fuente: Autor

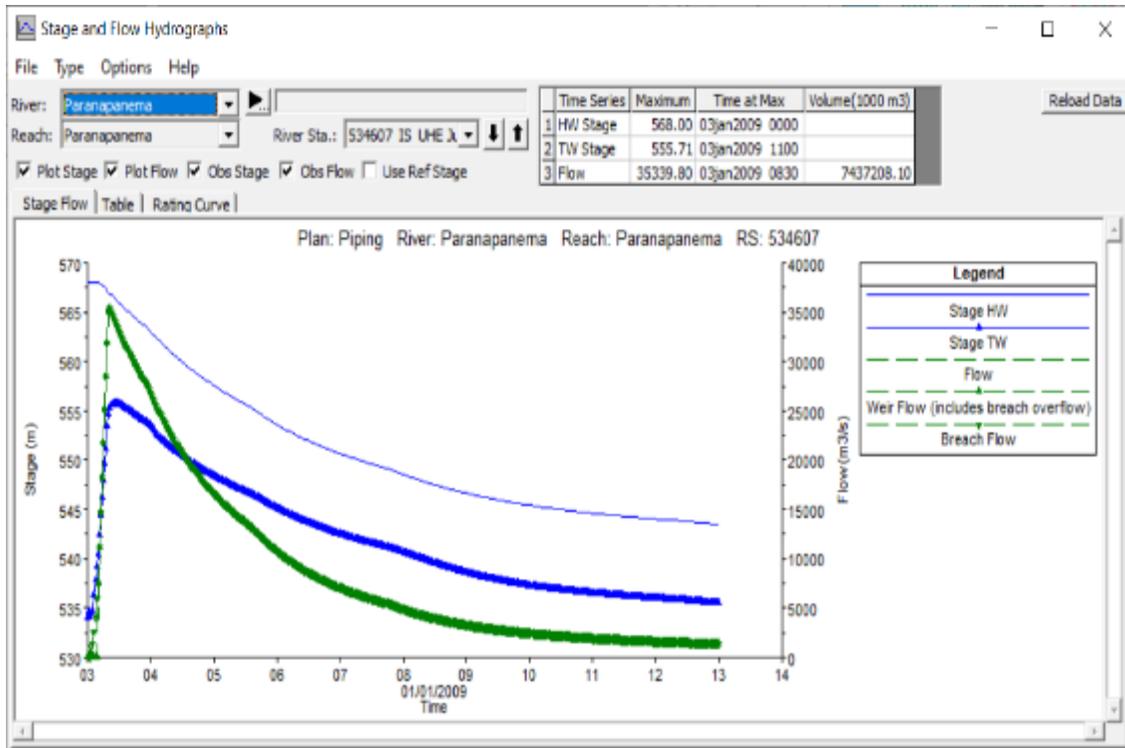


Figura 35: Hidrograma resultante del análisis en HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6437.385596	35339.8	-82%	
Pierce (2008)	2	5658.615823	35339.8	-84%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	35339.8	506%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	35339.8	123%	
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143	35339.8	-72%	
SCS (1981)	6	8597.287004	35339.8	-76%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	35339.8	-75%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	35339.8	123%	
Costa (1985)	9	486289.4272	35339.8	1276%	
Evans (1986)	10	125505.3961	35339.8	255%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	35339.8	-84%	
NRCS apud	12	8585.86194	35339.8	-76%	
Froehlich (1995b)	13	33099.08675	35339.8	-6%	0-10%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574	35339.8	56%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414	35339.8	407%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	35339.8	653%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	35339.8	894%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	7816.482929	35339.8	-78%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	19875.01135	35339.8	-44%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	35339.8	68%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	35339.8	662%	
Mohamed e.t.	22	31768.23141	35339.8	-10%	0-20%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	35339.8	-82%	
Xu and Zhang (2009)	24	100497.1415	35339.8	184%	
Macchione	25	13275.06	35339.8	-62%	
Macchione	26	19504.7781	35339.8	-45%	0-50%
Mohamed.e.t.	27	108686.0562	35339.8	208%	

Tabla 81: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.



Figura 36: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleira espesa (Singh, 1996) con 50%
- Macchione e.t. con 50%
- Mohamed e.t. con 20%
- Froehlich (1995b) con 10%

12.1.3. Caso 3

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	14.82
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568	hw (dam)	29.32
b	260	C1*	1.7
B	524	C2*	1.35
m	8	Tr (h)	1
hbrecha	16.5	hr	15
hw (breach)	14.50		0.05
hdam	31.32	α₁	1.704894914
h min op	21.02	β₁	0.5
Breach base level	553.5	α₁	1
Nivel da base da barragem	538.68	α₂	4
Borda livre	2	Bd	6
Ab (m2)	5452	Veroded (m3)	52810.8672
Abrecha	6468	T(s)	360
Bt	13.32	B2	0.26
Y	1.43	B3	-0.072
Ko	1	B4	-1.637
A6	7801.76903	B5	-2.49
angulo	1.446441332	rad	82.87478985

Tabla 82: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos.
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)
Pierce (2008)	1	6437.385596	25011.65
Pierce (2008)	2	5658.615823	25011.65
Pierce (2008)	3	214212.7318	25011.65
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	25011.65
Bureau of reclamation (1982)	5	2688.835116	25011.65
SCS (1981)	6	2336.893347	25011.65
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	25011.65
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	25011.65
Costa (1985)	9	486289.4272	25011.65
Evans (1986)	10	125505.3961	25011.65
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	25011.65
NRCS apud	12	2333.787814	25011.65
Froehlich (1995b)	13	13823.85011	25011.65
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	41217.50765	25011.65
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	134055.914	25011.65
Hagen (1982)	16	266045.2368	25011.65
Hagen (1982)	17	351436.0474	25011.65
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	30469.0489	25011.65
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	29624.30604	25011.65
Costa (1985)	20	59350.01853	25011.65
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	25011.65
Mohamed e.t.	22	43067.19691	25011.65
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	3641.540116	25011.65
Xu and Zhang (2009)	24	40979.7827	25011.65
Macchione	25	41663.50	25011.65
Macchione	26	72496.3171	25011.65
Mohamed.e.t.	27	90118.80526	25011.65

Tabla 83: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		3
Descrição		JPS3
Parametro		Valor
Center Station of the breach		1110
Final Bottom Longitudinal Width		260
Final Bottom Elevation		553.5
Left Side Slope		8
Right Side Slope		8
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.35
Failure Mode		Piping
Piping Coefficient		0.5
Initial Piping Elevation		553.5
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		533
Pool Elevation at Failure		568
Pool Volume at Failure		7100000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		6.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		2.7
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	800
	06/jan	800
	07/jan	800
	08/jan	800
	09/jan	800
	10/jan	800
Maximum Flow (m3/s)		25011.65
Data		03/jan

Tabla 84: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante
Fuente: Autor

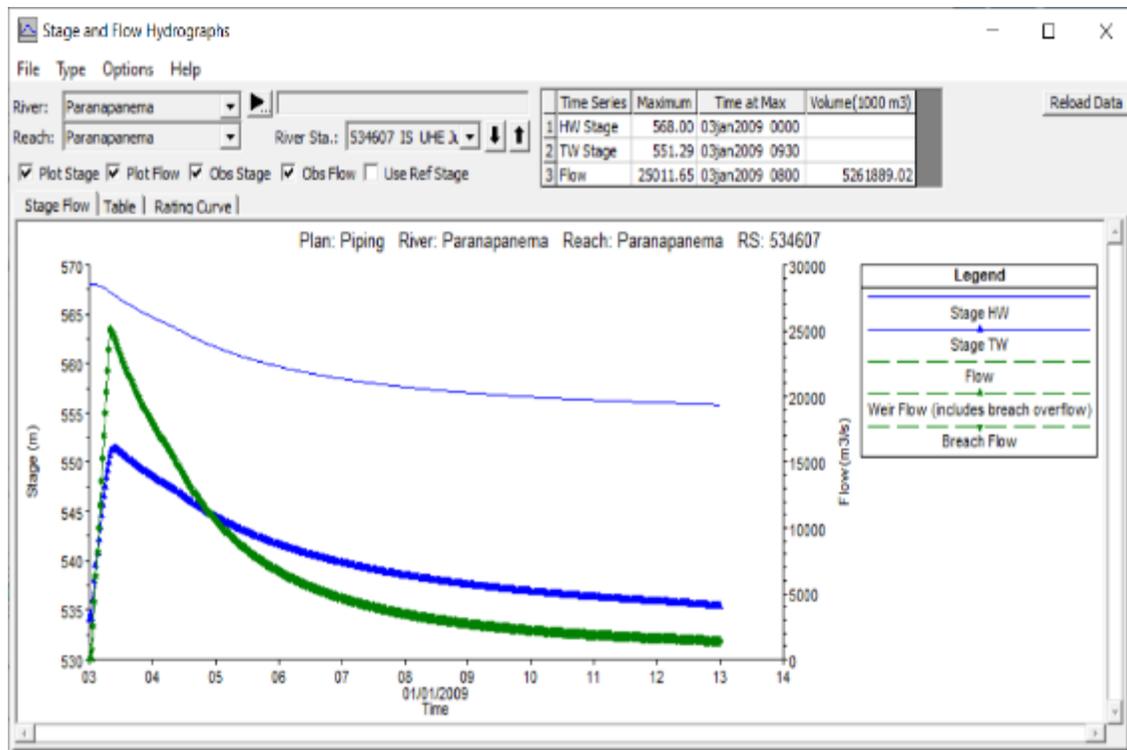


Figura 37: Hidrograma resultante del análisis en HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6437.385596	25011.65	-74%	
Pierce (2008)	2	5658.615823	25011.65	-77%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	25011.65	756%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	25011.65	216%	
Bureau of reclamation (1982)	5	2688.835116	25011.65	-89%	
SCS (1981)	6	2336.893347	25011.65	-91%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	25011.65	-64%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	25011.65	216%	
Costa (1985)	9	486289.4272	25011.65	1844%	
Evans (1986)	10	125505.3961	25011.65	402%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	25011.65	-78%	
NRCS apud	12	2333.787814	25011.65	-91%	
Froehlich (1995b)	13	13823.85011	25011.65	-45%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	41217.50765	25011.65	65%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	134055.914	25011.65	436%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	25011.65	964%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	25011.65	1305%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	30469.0489	25011.65	22%	0-50%
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	29624.30604	25011.65	18%	0-20%
Costa (1985)	20	59350.01853	25011.65	137%	
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228	25011.65	976%	
Mohamed e.t.	22	43067.19691	25011.65	72%	
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	3641.540116	25011.65	-85%	
Xu and Zhang (2009)	24	40979.7827	25011.65	64%	
Macchione	25	41663.50	25011.65	67%	
Macchione	26	72496.3171	25011.65	190%	
Mohamed.e.t.	27	90118.80526	25011.65	260%	

Tabla 85: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

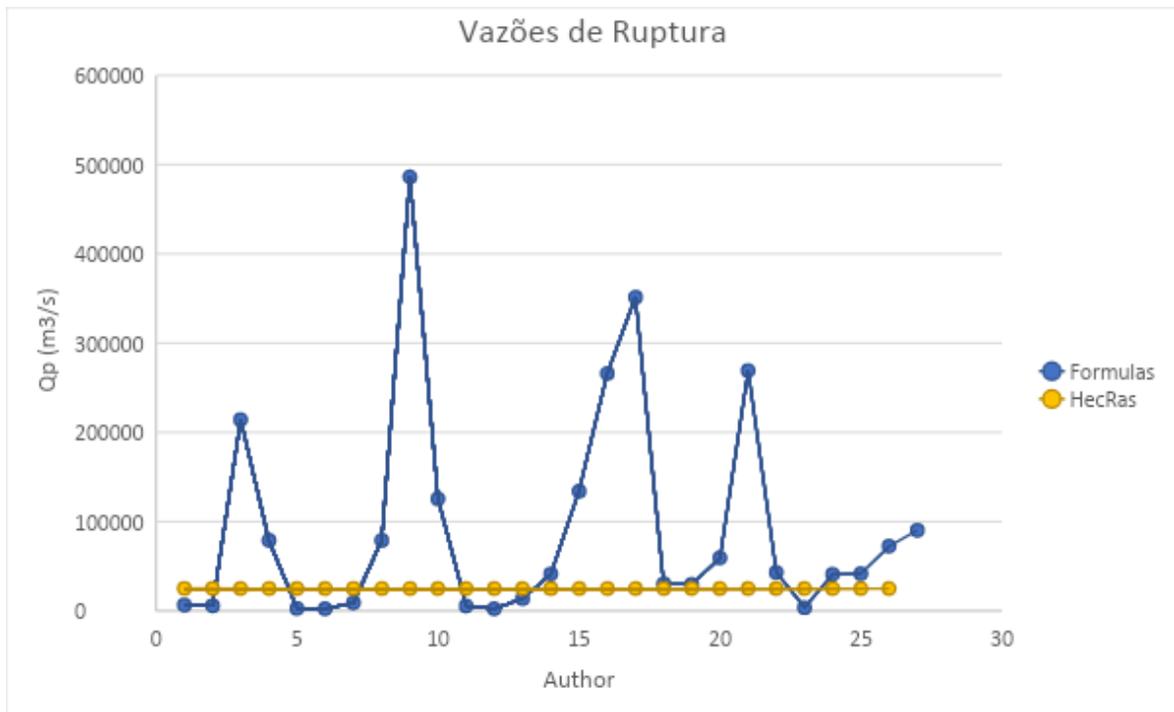


Figura 38: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Froehlich (1995b) con 50%
- Saint Venant apud US Army Corps of Engineers (1997) con 50%
- Vertedor de Soleira Espesa (Singh, 1996) con 20%

12.2.4. Caso 4

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	28.82
T(h)	0.1	p	1
NA max max	568	hw (dam)	29.32
b	92.76	C1*	1.7
B	364.07	C2*	1.35
m	4.33	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	29.32		0.05
hdam	31.32	α1	1.704894914
h min op	21.02	β1	0.5
Breach base level	538.68	α1	1
Nivel da base da barragem	538.68	α2	4
Borda livre	2	Bd	6
Ab (m2)	6442.061392	Veroded (m3)	94674.85395
Abrecha	7153.9578	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.26
Y	10.7204157	B3	-0.072
Ko	1	B4	-1.637
A6	5737.299401	B5	-2.49
angulo	1.343828816	rad	76.99553951

Tabla 86: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada, podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	6437.385596
Pierce (2008)	2	5658.615823
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143
SCS (1981)	6	8597.287004
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	8585.86194
Froehlich (1995b)	13	33099.08675
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	10870.41914
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	44180.22707
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	100497.1415
Macchione	25	8190.12
Macchione	26	7807.685695
Mohamed.e.t.	27	19773.58607

Tabla 87: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação	4
Descrição	JPS4
Parametro	Valor
Center Station of the breach	3035
Final Bottom Longitudinal Width	25
Final Bottom Elevation	533
Left Side Slope	6.4
Right Side Slope	2.7
Breach Weir Coefficient	1.44
Breach Formation Time (hrs)	7.35
Failure Mode	Piping
Piping Coefficient	0.5
Initial Piping Elevation	567.5
Trigger Failure at	WS Elev
Starting WS	568
Top of Dam Elevation	570
Breach Bottom Elevation	533
Pool Elevation at Failure	568
Pool Volume at Failure	7100000
Dam Crest Width	6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)	6.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)	2.7
Earth Fill Type	Fine Homogeneous
Dam Type	Concrete - faced dam
Dam Erodibility	High
Boundary conditions	800
	800
	800
	800
	800
	800
Maximum Flow (m3/s)	39752.55
Data	03/jan

Tabla 88: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante
Fuente: Autor

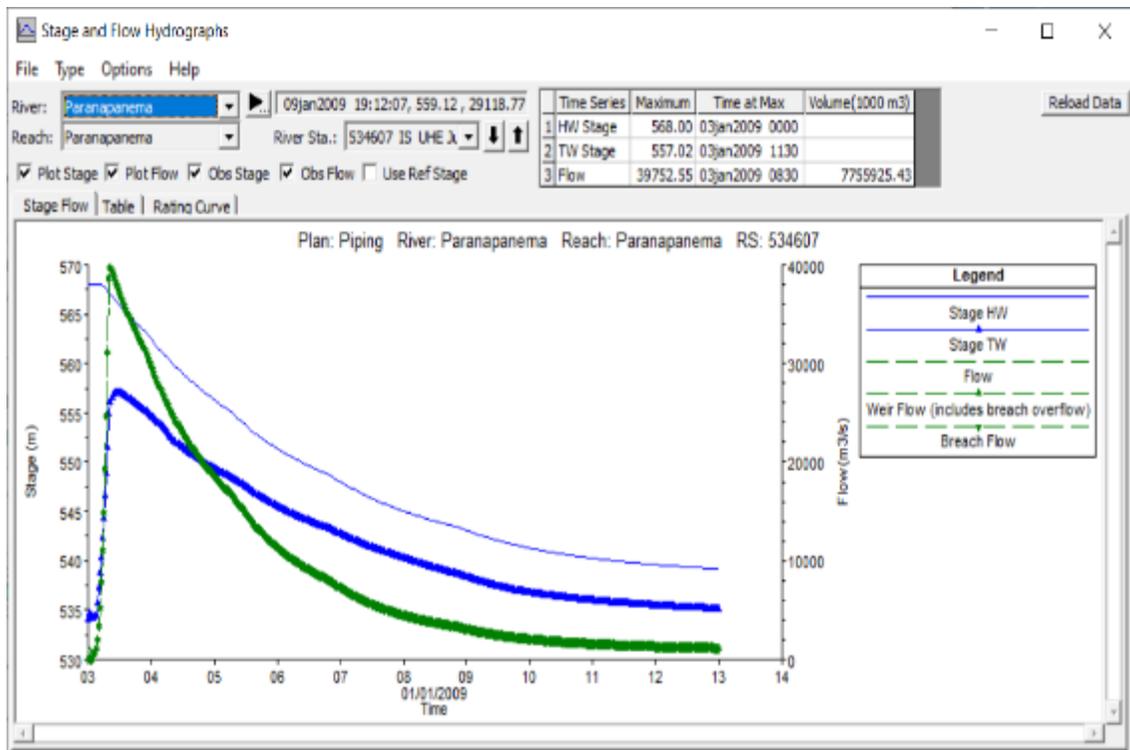


Figura 39: Hidrograma resultante del análisis HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferencia	Rango
Pierce (2008)	1	6437.385596	39752.55	-84%	
Pierce (2008)	2	5658.615823	39752.55	-86%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	39752.55	439%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	39752.55	99%	
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143	39752.55	-75%	
SCS (1981)	6	8597.287004	39752.55	-78%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	39752.55	-77%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	39752.55	99%	
Costa (1985)	9	486289.4272	39752.55	1123%	
Evans (1986)	10	125505.3961	39752.55	216%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	39752.55	-86%	
NRCS apud	12	8585.86194	39752.55	-78%	
Froehlich (1995b)	13	33099.08675	39752.55	-17%	0-20%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574	39752.55	39%	0-50%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414	39752.55	350%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	39752.55	569%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	39752.55	784%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	10870.41914	39752.55	-73%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	27640.27066	39752.55	-30%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	39752.55	49%	0-50%
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	39752.55	577%	
Mohamed e.t.	22	44180.22707	39752.55	11%	0-20%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	39752.55	-84%	
Xu and Zhang (2009)	24	100497.1415	39752.55	153%	
Macchione	25	8190.12	39752.55	-79%	
Macchione	26	7807.685695	39752.55	-80%	
Mohamed.e.t.	27	19773.58607	39752.55	-50%	

Tabla 89: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

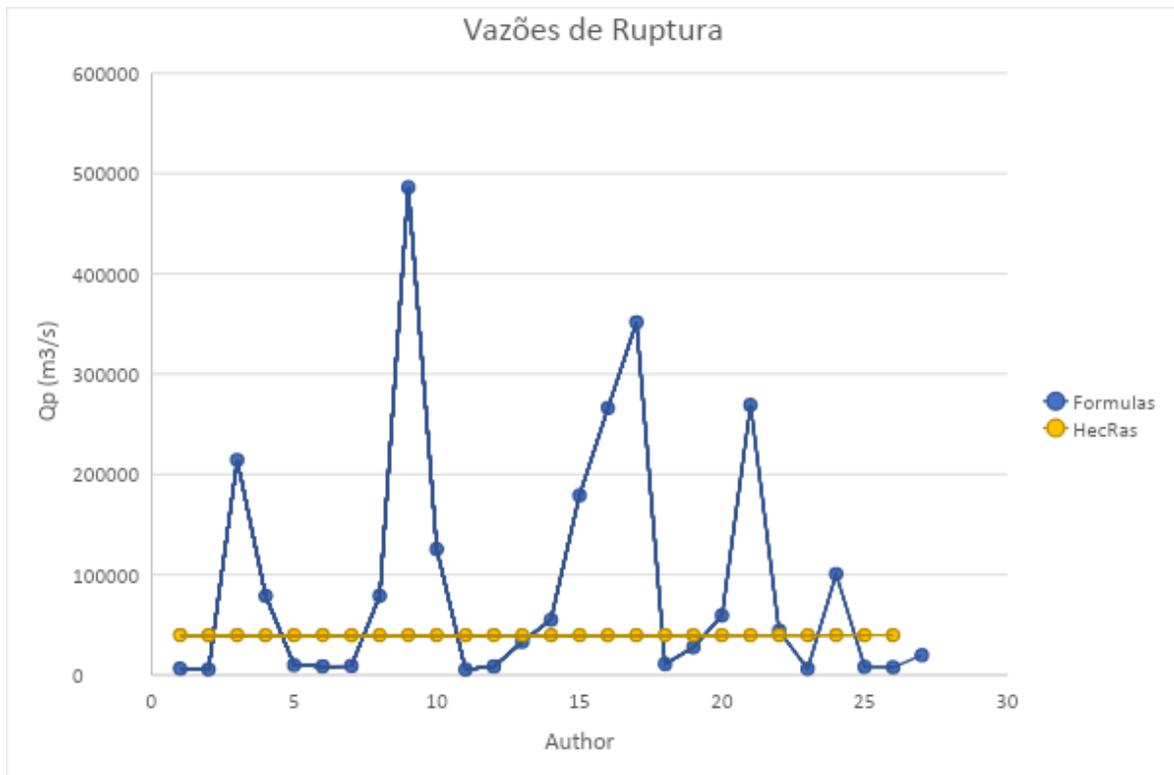


Figura 40: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleira espesa (Singh, 1996) con 50%
- Costa (1985) con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) con 50%
- Froehlich (1995b) con 20%
- Mohamed e.t. con 20%

12.2.5. Caso 5

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	775000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	28.82
T(h)	0.1	ρ	1
NA max max	568	hw (dam)	29.32
b	66.7	C1*	1.7
B	354.32	C2*	1.35
m	4.59	Tr (h)	1
hbrecha	31.32	hr	15
hw (breach)	29.32		0.05
hdam	31.32	α_1	1.704894914
h min op	21.02	β_1	0.5
Breach base level	538.68	α_1	1
Nivel da base da barragem	538.68	α_2	4
Borda livre	2	Bd	6
Ab (m2)	5901.494416	Veroded (m3)	87253.47944
Abrecha	6593.1732	T(s)	360
Bt	24.435	B2	0.26
Y	7.276949891	B3	-0.072
Ko	1	B4	-1.637
A6	5906.64447	B5	-2.49
angulo	1.356283441	rad	77.70913528

Tabla 90: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos

Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m ³)
Pierce (2008)	1	6437.385596
Pierce (2008)	2	5658.615823
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143
SCS (1981)	6	8597.287004
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987
NRCS apud	12	8585.86194
Froehlich (1995b)	13	33099.08675
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414
Hagen (1982)	16	266045.2368
Hagen (1982)	17	351436.0474
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	7816.482929
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	19875.01135
Costa (1985)	20	59350.01853
Costa (1985) Envolved Equation	21	269196.9228
Mohamed e.t.	22	31768.23141
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613
Xu and Zhang (2009)	24	100497.1415
Macchione	25	13275.06
Macchione	26	19504.7781
Mohamed.e.t.	27	18114.34271

Tabla 91: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		5
Descrição		JPS5
Parametro		Valor
Center Station of the breach		3035
Final Bottom Longitudinal Width		68
Final Bottom Elevation		538.68
Left Side Slope		6.4
Right Side Slope		2.7
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		7.35
Failure Mode		Piping
Piping Coefficient		0.5
Initial Piping Elevation		567.5
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		568
Top of Dam Elevation		570
Breach Bottom Elevation		533
Pool Elevation at Failure		568
Pool Volume at Failure		7100000
Dam Crest Width		6
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		6.4
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		2.7
Earth Fill Type		Fine Homogeneous
Dam Type		Concrete - faced dam
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	800
	06/jan	800
	07/jan	800
	08/jan	800
	09/jan	800
	10/jan	800
Maximum Flow (m3/s)		35919.27
Data		03/jan

Tabla 92: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante
Fuente: Autor

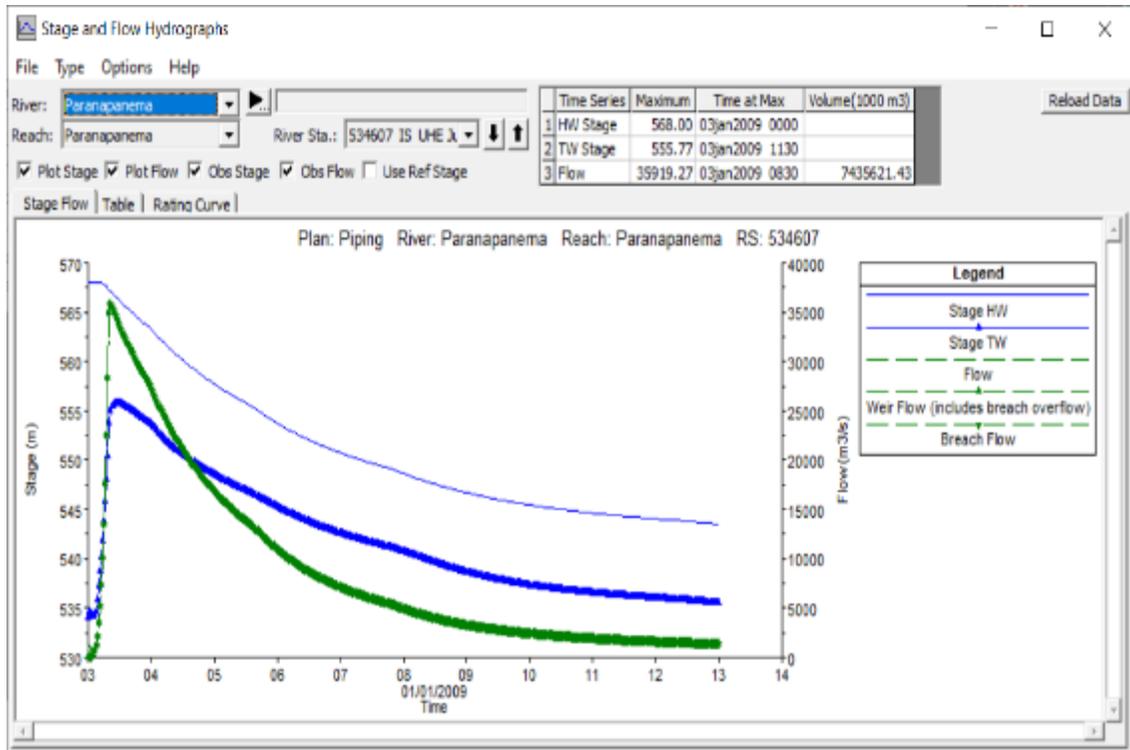


Figura 41: Hidrograma resultante del análisis en HecRas

Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	6437.385596	35919.27	-82%	
Pierce (2008)	2	5658.615823	35919.27	-84%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	35919.27	496%	
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	35919.27	120%	
Bureau of reclamation (1982)	5	9892.059143	35919.27	-72%	
SCS (1981)	6	8597.287004	35919.27	-76%	
Singh and Snorrason (1984)	7	8999.283062	35919.27	-75%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	35919.27	120%	
Costa (1985)	9	486289.4272	35919.27	1254%	
Evans (1986)	10	125505.3961	35919.27	249%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	5508.768987	35919.27	-85%	
NRCS apud	12	8585.86194	35919.27	-76%	
Froehlich (1995b)	13	33099.08675	35919.27	-8%	0-10%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	55089.60574	35919.27	53%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	179047.4414	35919.27	398%	
Hagen (1982)	16	266045.2368	35919.27	641%	
Hagen (1982)	17	351436.0474	35919.27	878%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	7816.482929	35919.27	-78%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	19875.01135	35919.27	-45%	0-50%
Costa (1985)	20	59350.01853	35919.27	65%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	269196.9228	35919.27	649%	
Mohamed e.t.	22	31768.23141	35919.27	-12%	0-20%
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	6228.524613	35919.27	-83%	
Xu and Zhang (2009)	24	100497.1415	35919.27	180%	
Macchione	25	13275.06	35919.27	-63%	
Macchione	26	19504.7781	35919.27	-46%	0-50%
Mohamed.e.t.	27	18114.34271	35919.27	-50%	0-50%

Tabla 93: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

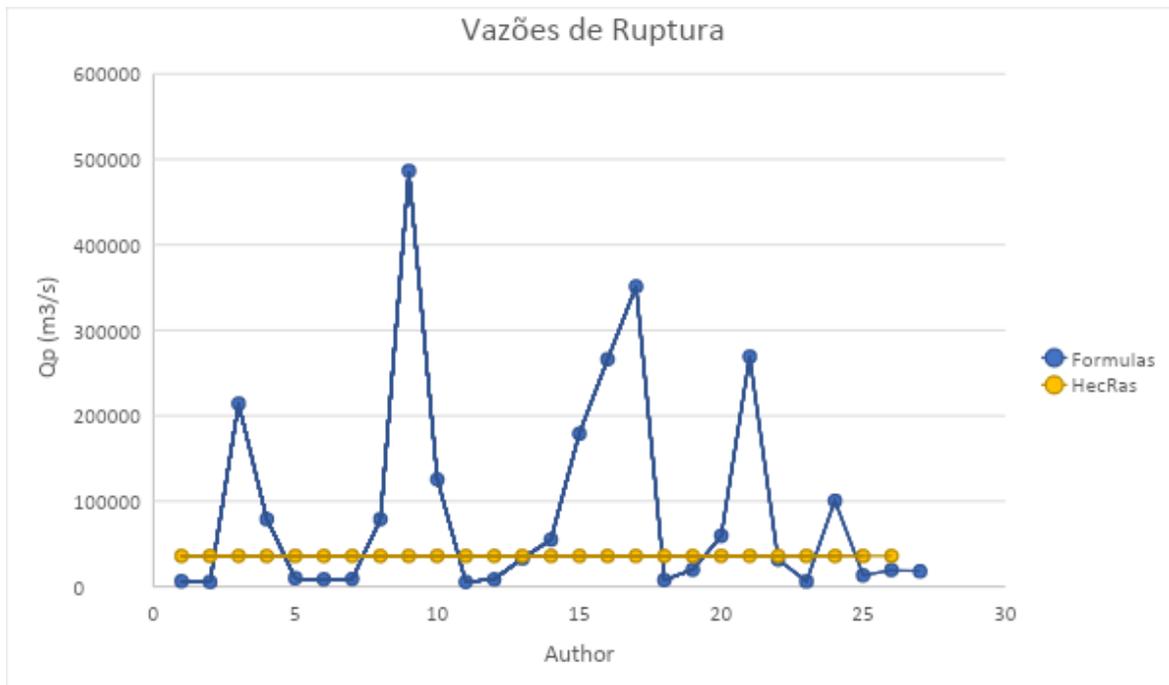


Figura 42: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Vertedor de soleira espesa (Singh, 1996) con 50%
- Macchione con 50%
- Mohamed e.t. para tuberías con 50%

$$Q_b = 0.98A\sqrt{2g(H - H_p)}$$

- Mohamed e.t. con 20%

$$Q_b = 3B_o(H - H_c)^{1.5}$$

- Froehlich (1995b) con 10%

12.2. Represa de Chavantes con ruptura por Overtopping

12.3.1. Caso 3

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	474	hw (dam)	64
b	625.43	C1*	1.7
B	840.52	C2*	1.35
m	1.68	Tr (h)	1
hbrecha	69.6	hr	15
hw (breach)	64.00		0.05
hdam	69.6	α1	1.704894914
h min op	149.7	β1	0.5
Breach base level	410	α1	1
Nível da base da barragem	410	α2	4
Borda livre	5.6	Bd	11
Ab (m2)	46908.80	Veroded (m3)	10325448.14
Abrecha	51015.06	T(s)	360
Bt	393.8	B2	0.771
Y	180.5547619	B3	0.399
Ko	1.4	B4	-1.215
A6	3627.556021	B5	-2.111
angulo	1.033885584	rad	59.23714194

Tabla 94: Datos de la represa a partir de los cuales haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	51665.92787
Pierce (2008)	2	21427.3663
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	41924.34818
SCS (1981)	6	36436.86805
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606
NRCS apud	12	36388.44655
Froehlich (1995b)	13	87135.64716
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	75987.86798
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	246776.4421
Hagen (1982)	16	396596.823
Hagen (1982)	17	515589.7787
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	641063.7586
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	617364.2685
Costa (1985)	20	82998.75981
Costa (1985) Envolved Equation	21	382522.1474
Mohamed e.t.	22	960660.48
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332
Xu and Zhang (2009)	24	485672.0202

Tabla 95: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		3
Descrição		COS1a.ed
Parametro		Valor
Center Station of the breach		1315
Final Bottom Longitudinal Width		500
Final Bottom Elevation		410
Left Side Slope		2
Right Side Slope		3
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		11.12
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		474
Top of Dam Elevation		479.6
Breach Bottom Elevation		391.8
Pool Elevation at Failure		474
Pool Volume at Failure		9500000
Dam Crest Width		11
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		0.9
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0.9
Earth Fill Type		Non-homogeneous or Rockfill
Dam Type		Dam with corewall
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	3500
	06/jan	3500
	07/jan	3500
	08/jan	3500
	09/jan	3500
	10/jan	3500
Maximum Flow (m3/s)		234517.3
Data		03/jan

Tabla 96: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante
Fuente: Autor

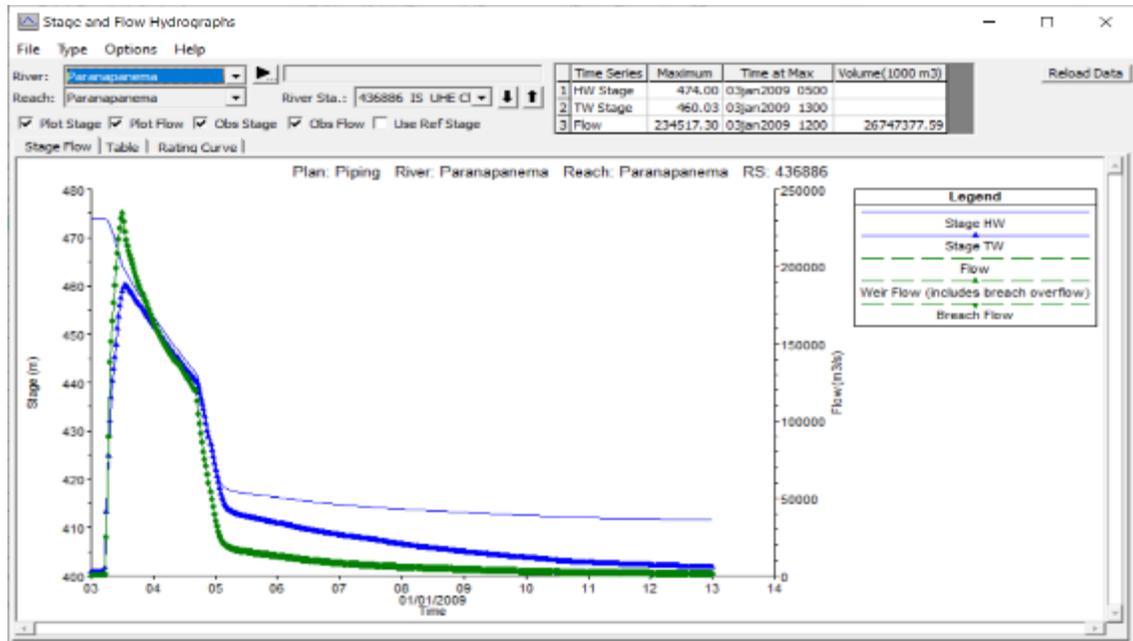


Figura 43: Hidrograma resultante del análisis en HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	51665.92787	234517.3	-78%	
Pierce (2008)	2	21427.3663	234517.3	-91%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	234517.3	-9%	0-10%
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	234517.3	-66%	
Bureau of reclamation (1982)	5	41924.34818	234517.3	-82%	
SCS (1981)	6	36436.86805	234517.3	-84%	
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236	234517.3	-83%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	234517.3	-66%	
Costa (1985)	9	486289.4272	234517.3	107%	
Evans (1986)	10	125505.3961	234517.3	-46%	0-50%
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606	234517.3	-89%	
NRCS apud	12	36388.44655	234517.3	-84%	
Froehlich (1995b)	13	87135.64716	234517.3	-63%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	75987.86798	234517.3	-68%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	246776.4421	234517.3	5%	0-10%
Hagen (1982)	16	396596.823	234517.3	69%	
Hagen (1982)	17	515589.7787	234517.3	120%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	641063.7586	234517.3	173%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	617364.2685	234517.3	163%	
Costa (1985)	20	82998.75981	234517.3	-65%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	382522.1474	234517.3	63%	
Mohamed e.t.	22	960660.48	234517.3	310%	
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332	234517.3	-86%	
Xu and Zhang (2009)	24	485672.0202	234517.3	107%	

Tabla 97: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.

Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

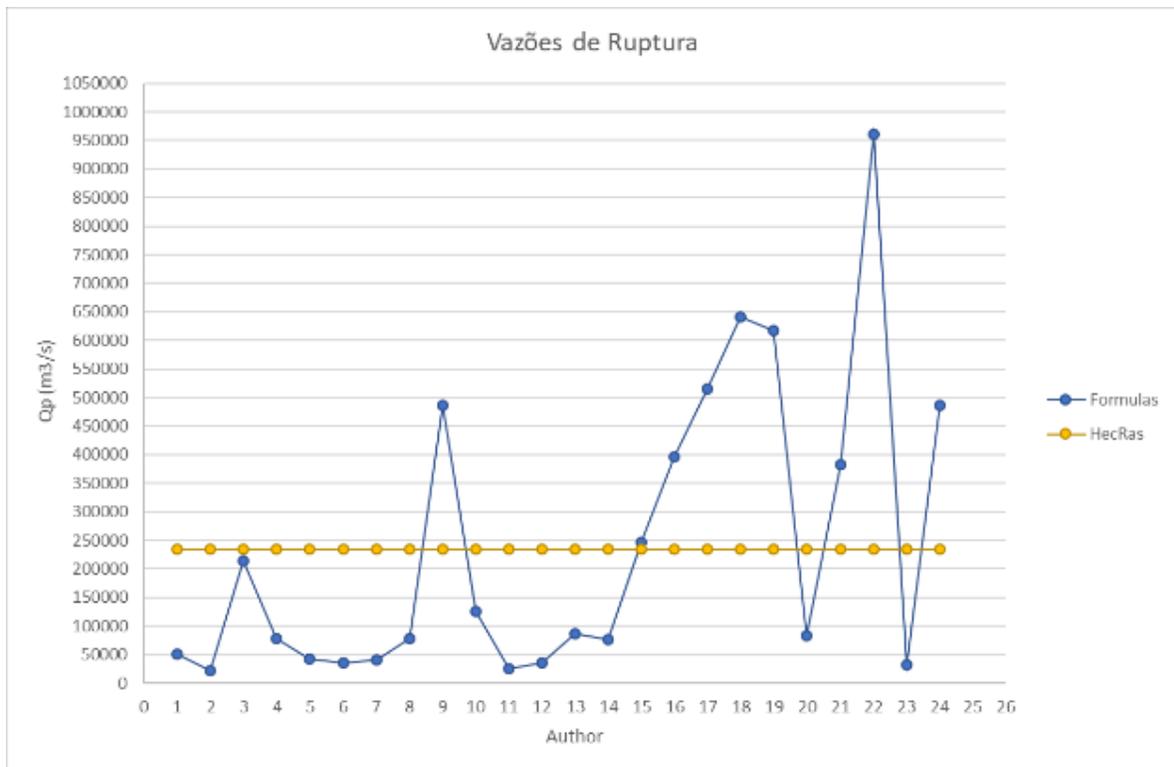


Figura 44: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Evans (1986) con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) Ecuación envuelta con 10%
- Pierce (2008) con un 10%

12.3.2. Caso 4

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	474.5	hw (dam)	64.5
b	612.66	C1*	1.7
B	841.92	C2*	1.35
m	1.78	Tr (h)	1
hbrecha	69.6	hr	15
hw (breach)	64.50		0.05
hdam	69.6	α_1	1.704894914
h min op	149.7	β_1	0.5
Breach base level	410	α_1	1
Nivel da base da barragem	410	α_2	4
Borda livre	5.1	Bd	11
Ab (m2)	46921.82	Veroded (m3)	10245363.32
Abrecha	50619.384	T(s)	360
Bt	393.8	B2	0.771
Y	166.894382	B3	0.399
Ko	1.4	B4	-1.215
A6	3728.719925	B5	-2.111
angulo	1.058940484	rad	60.67267863

Tabla 98: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada, podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	52749.8685
Pierce (2008)	2	21685.47757
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	42532.29714
SCS (1981)	6	36965.24254
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606
NRCS apud	12	36916.11887
Froehlich (1995b)	13	87980.56355
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	76231.89446
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	247567.0103
Hagen (1982)	16	396596.823
Hagen (1982)	17	515589.7787
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	630179.7729
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	604758.9542
Costa (1985)	20	82998.75981
Costa (1985) Envolved Equation	21	382522.1474
Mohamed e.t.	22	952095.1509
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332
Xu and Zhang (2009)	24	490511.1386

Tabla 99: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		4
Descrição		COS1a.not
Parametro		Valor
Center Station of the breach		1315
Final Bottom Longitudinal Width		500
Final Bottom Elevation		410
Left Side Slope		2
Right Side Slope		3
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		11.12
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		474
Top of Dam Elevation		479.6
Breach Bottom Elevation		391.8
Pool Elevation at Failure		474.5
Pool Volume at Failure		9500000
Dam Crest Width		11
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		0.9
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0.9
Earth Fill Type		Non-homogeneous or Rockfill
Dam Type		Dam with corewall
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	3500
	06/jan	3500
	07/jan	3500
	08/jan	3500
	09/jan	3500
	10/jan	3500
Maximum Flow		229370.9
		03/jan

Tabla 100: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante.

Fuente: Autor

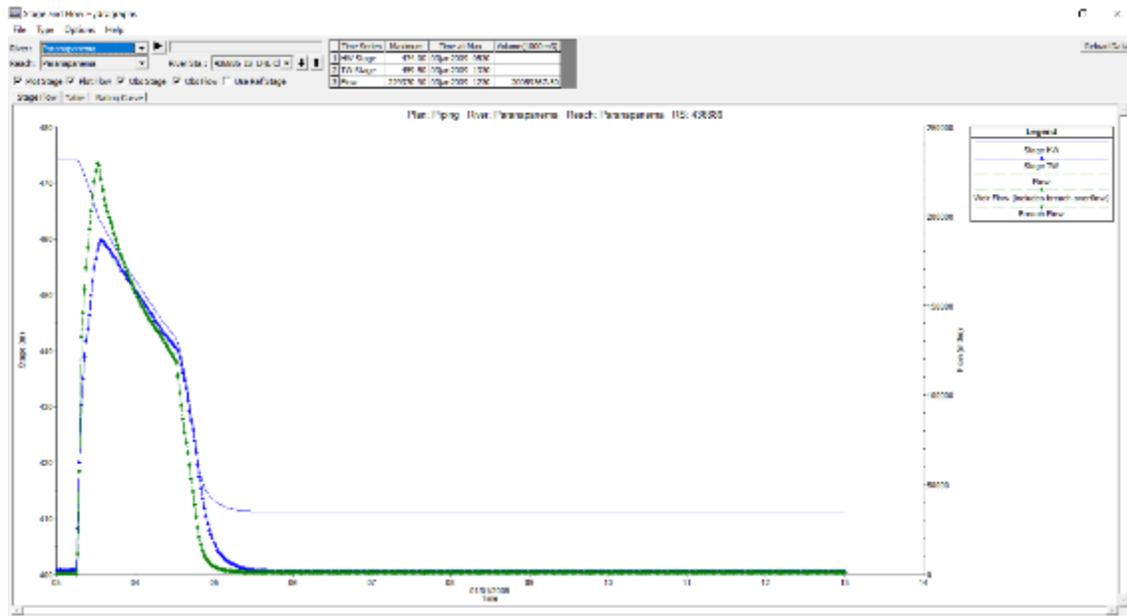


Figura 45: Hidrograma resultante del análisis en HecRas. **Fuente:** Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	52749.8685	229370.9	-77%	
Pierce (2008)	2	21685.47757	229370.9	-91%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	229370.9	-7%	0-10%
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	229370.9	-66%	
Bureau of reclamation (1982)	5	42532.29714	229370.9	-81%	
SCS (1981)	6	36965.24254	229370.9	-84%	
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236	229370.9	-82%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	229370.9	-66%	
Costa (1985)	9	486289.4272	229370.9	112%	
Evans (1986)	10	125505.3961	229370.9	-45%	0-50%
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606	229370.9	-89%	
NRCS apud	12	36916.11887	229370.9	-84%	
Froehlich (1995b)	13	87980.56355	229370.9	-62%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	76231.89446	229370.9	-67%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	247567.0103	229370.9	8%	0-10%
Hagen (1982)	16	396596.823	229370.9	73%	
Hagen (1982)	17	515589.7787	229370.9	125%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	630179.7729	229370.9	175%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	604758.9542	229370.9	164%	
Costa (1985)	20	82998.75981	229370.9	-64%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	382522.1474	229370.9	67%	
Mohamed e.t.	22	952095.1509	229370.9	315%	
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332	229370.9	-86%	
Xu and Zhang (2009)	24	490511.1386	229370.9	114%	

Tabla 101: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

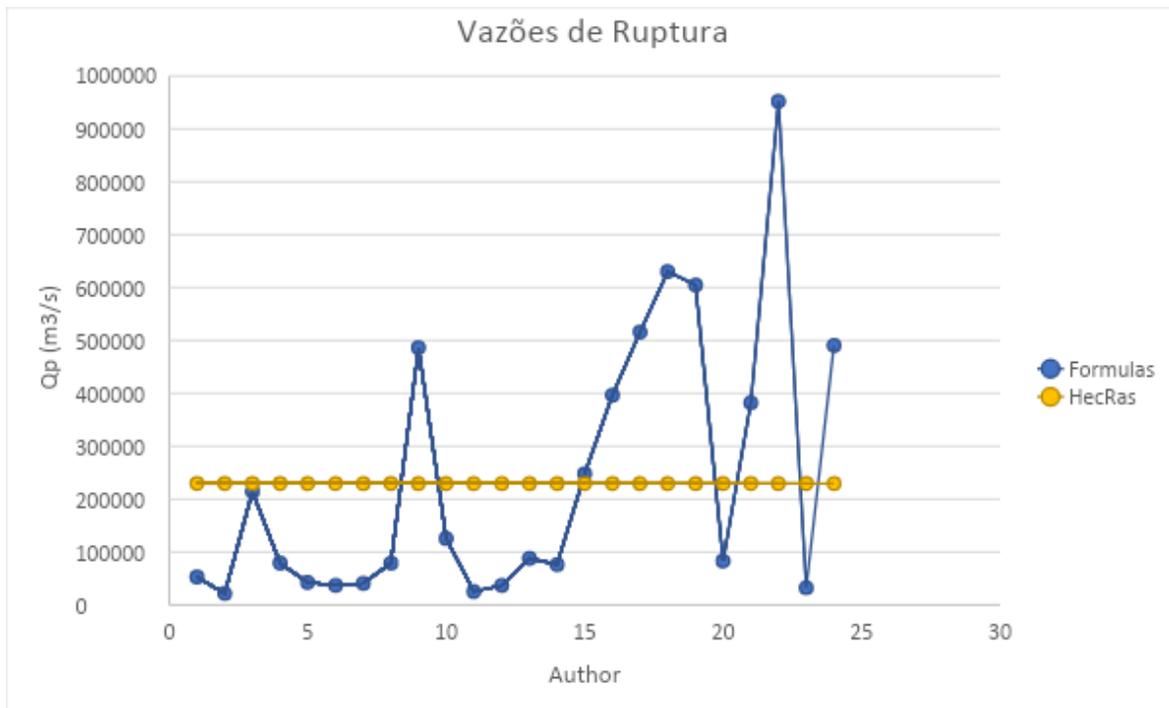


Figura 46: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Evans (1986) con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) Ecuación envuelta con 10%
- Pierce (2008) con un 10%

12.2.3.Caso 5

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	474.01	hw (dam)	64.01
b	625.17	C1*	1.7
B	840.55	C2*	1.35
m	1.68	Tr (h)	1
hbrecha	69.6	hr	15
hw (breach)	64.01		0.05
h dam	69.6	α1	1.704894914
h min op	149.7	β1	0.5
Breach base level	410	α1	1
Nivel da base da barragem	410	α2	4
Borda livre	5.59	Bd	11
Ab (m2)	46900.56	Veroded (m3)	10323828.13
Abrecha	51007.056	T(s)	360
Bt	393.8	B2	0.771
Y	180.5636905	B3	0.399
Ko	1.4	B4	-1.215
A6	3627.511203	B5	-2.111
angulo	1.033885584	rad	59.23714194

Tabla 102: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos.
Fuente: Autor

Pero la represa no se rompió

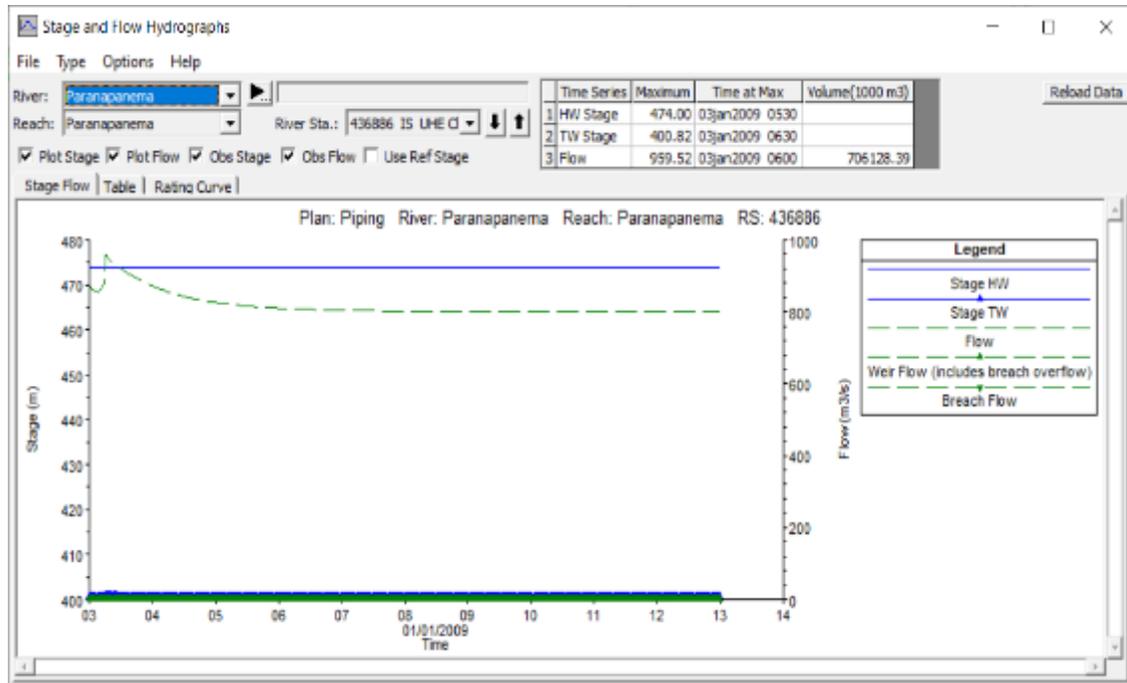


Figura 47: Hidrograma resultante del análisis en HecRas. **Fuente:** Software HecRas

12.2.4.Caso 6

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	ρ	1
NA max max	474	hw (dam)	64
b	625.43	C1*	1.7
B	840.52	C2*	1.35
m	1.68	Tr (h)	1
hbrecha	69.6	hr	15
hw (breach)	64.00		0.05
hdam	69.6	α_1	1.704894914
h min op	149.7	β_1	0.5
Breach base level	410	α_1	1
Nivel da base da barragem	410	α_2	4
Borda livre	5.6	Bd	11
Ab (m2)	46908.80	Veroded (m3)	10325448.14
Abrecha	51015.06	T(s)	360
Bt	393.8	B2	0.771
Y	180.5547619	B3	0.399
Ko	1.4	B4	-1.215
A6	3627.556021	B5	-2.111
angulo	1.033885584	rad	59.23714194

Tabla 103: Datos de la represa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m ³)
Pierce (2008)	1	51665.92787
Pierce (2008)	2	21427.3663
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	41924.34818
SCS (1981)	6	36436.86805
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606
NRCS apud	12	36388.44655
Froehlich (1995b)	13	87135.64716
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	75987.86798
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	246776.4421
Hagen (1982)	16	396596.823
Hagen (1982)	17	515589.7787
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	641063.7586
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	617364.2685
Costa (1985)	20	82998.75981
Costa (1985) Envolved Equation	21	382522.1474
Mohamed e. t.	22	960660.48
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332
Xu and Zhang (2009)	24	485672.0202

Tabla 104: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, si los datos de entrada necesarios se presentarán en el software HecRas, también se colocará el pico resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		6
Descrição		COS3b.ed
Parametro		Valor
Center Station of the breach		1315
Final Bottom Longitudinal Width		500
Final Bottom Elevation		410
Left Side Slope		2
Right Side Slope		3
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		11.19
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		474
Top of Dam Elevation		479.6
Breach Bottom Elevation		391.8
Pool Elevation at Failure		474
Pool Volume at Failure		9500000
Dam Crest Width		11
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		0.9
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0.9
Earth Fill Type		Non-homogeneous or Rockfill
Dam Type		Dam with corewall
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	5000
	06/jan	8000
	07/jan	10000
	08/jan	12000
	09/jan	20000
	10/jan	35000
Maximum Flow		229370.9
		03/jan

Tabla 105: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante
Fuente: Autor

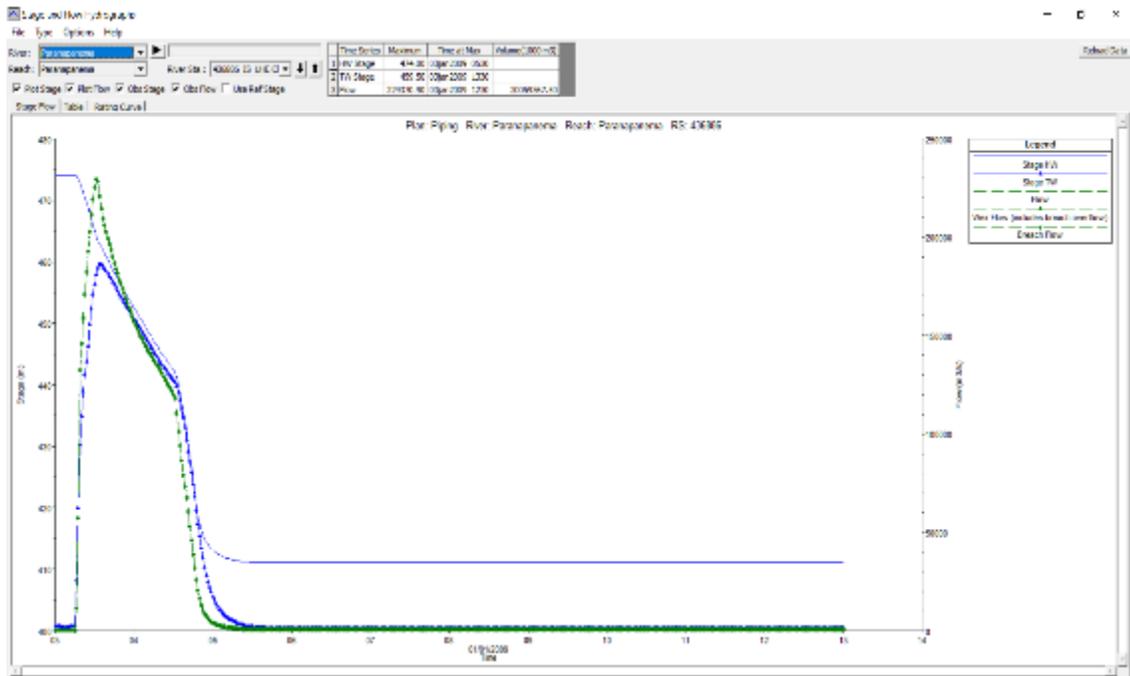


Figura 48: Hidrograma resultante del análisis en HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	51665.92787	229370.9	-77%	
Pierce (2008)	2	21427.3663	229370.9	-91%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	229370.9	-7%	0-10%
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	229370.9	-66%	
Bureau of reclamation (1982)	5	41924.34818	229370.9	-82%	
SCS (1981)	6	36436.86805	229370.9	-84%	
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236	229370.9	-82%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	229370.9	-66%	
Costa (1985)	9	486289.4272	229370.9	112%	
Evans (1986)	10	125505.3961	229370.9	-45%	0-50%
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606	229370.9	-89%	
NRCS apud	12	36388.44655	229370.9	-84%	
Froehlich (1995b)	13	87135.64716	229370.9	-62%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	75987.86798	229370.9	-67%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	246776.4421	229370.9	8%	0-10%
Hagen (1982)	16	396596.823	229370.9	73%	
Hagen (1982)	17	515589.7787	229370.9	125%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	641063.7586	229370.9	179%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	617364.2685	229370.9	169%	
Costa (1985)	20	82998.75981	229370.9	-64%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	382522.1474	229370.9	67%	
Mohamed e.t.	22	960660.48	229370.9	319%	
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332	229370.9	-86%	
Xu and Zhang (2009)	24	485672.0202	229370.9	112%	

Tabla 106: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.



Figura 49: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Evans (1986) con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) Ecuación envuelta con 10%
- Pierce (2008) con un 10%

12.2.5.Caso 7

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	
T(h)	0.1	p	1
NA max max	475.5	hw (dam)	65.5
b	612.66	C1*	1.7
B	841.92	C2*	1.35
m	1.78	Tr (h)	1
hbrecha	69.6	hr	15
hw (breach)	65.50		0.05
hdam	69.6	α1	1.704894914
h min op	149.7	β1	0.5
Breach base level	410	α1	1
Nivel da base da barragem	410	α2	4
Borda livre	4.1	Bd	11
Ab (m2)	47765.88	Veroded (m3)	10245363.32
Abrecha	50619.384	T(s)	360
Bt	393.8	B2	0.771
Y	166.894382	B3	0.399
Ko	1.4	B4	-1.215
A6	3728.719925	B5	-2.111
angulo	1.058940484	rad	60.67267863

Tabla 107: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m ³)
Pierce (2008)	1	54960.14262
Pierce (2008)	2	22203.47816
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	43760.24776
SCS (1981)	6	38032.46664
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606
NRCS apud	12	37981.92472
Froehlich (1995b)	13	89675.10736
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	76716.63157
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	249137.3861
Hagen (1982)	16	396596.823
Hagen (1982)	17	515589.7787
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	634597.9431
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	604758.9542
Costa (1985)	20	82998.75981
Costa (1985) Envolved Equation	21	382522.1474
Mohamed e.t.	22	974322.4988
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332
Xu and Zhang (2009)	24	500220.1863

Tabla 108: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, se presentarán los datos de entrada necesarios en el software HecRas, también se colocó el pico de flujo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		7
Descrição		COS3b.not
Parametro		Valor
Center Station of the breach		1315
Final Bottom Longitudinal Width		500
Final Bottom Elevation		410
Left Side Slope		2
Right Side Slope		3
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		11.19
Failure Mode		Overtopping
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		474
Top of Dam Elevation		479.6
Breach Bottom Elevation		391.8
Pool Elevation at Failure		475.5
Pool Volume at Failure		9500000
Dam Crest Width		11
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		0.9
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0.9
Earth Fill Type		Non-homogeneous or Rockfill
Dam Type		Dam with corewall
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	5000
	06/jan	8000
	07/jan	10000
	08/jan	12000
	09/jan	20000
	10/jan	35000
Maximum Flow		233993.4
		03/jan

Tabla 109: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante

Fuente: Autor

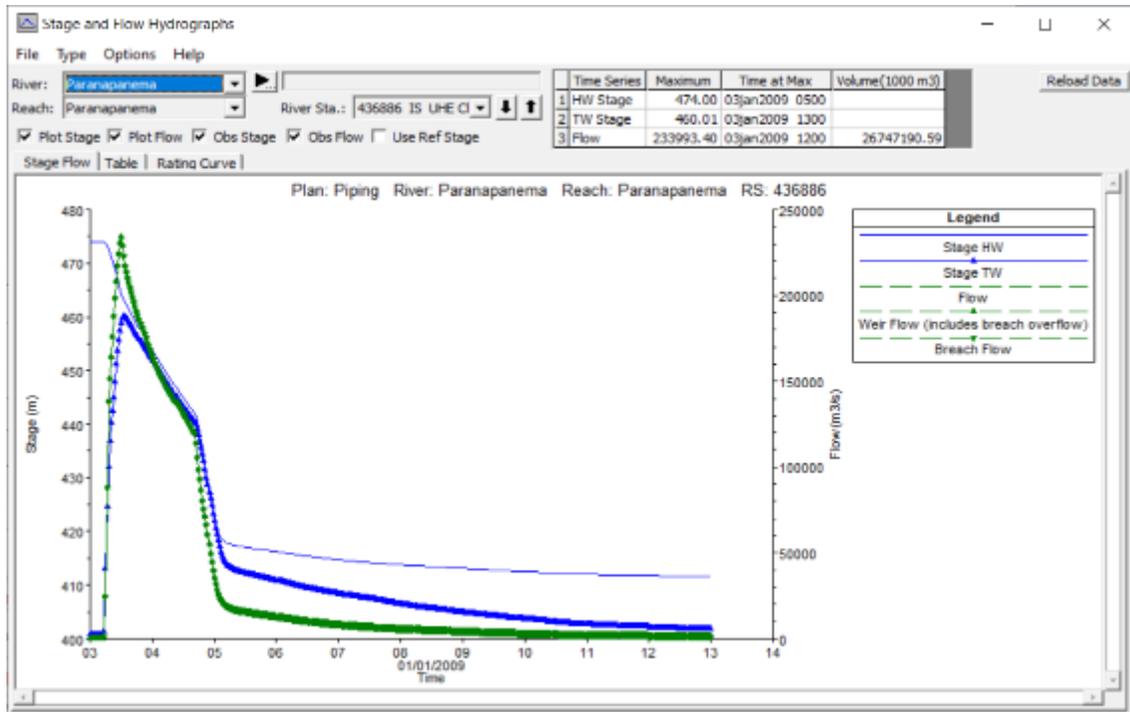


Figura 50: Hidrograma resultante del análisis HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	54960.14262	233993.4	-77%	
Pierce (2008)	2	22203.47816	233993.4	-91%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	233993.4	-8%	0-10%
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	233993.4	-66%	
Bureau of reclamation (1982)	5	43760.24776	233993.4	-81%	
SCS (1981)	6	38032.46664	233993.4	-84%	
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236	233993.4	-83%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	233993.4	-66%	
Costa (1985)	9	486289.4272	233993.4	108%	
Evans (1986)	10	125505.3961	233993.4	-46%	0-50%
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606	233993.4	-89%	
NRCS apud	12	37981.92472	233993.4	-84%	
Froehlich (1995b)	13	89675.10736	233993.4	-62%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	76716.63157	233993.4	-67%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	249137.3861	233993.4	6%	0-10%
Hagen (1982)	16	396596.823	233993.4	69%	
Hagen (1982)	17	515589.7787	233993.4	120%	
nt Venat apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	634597.9431	233993.4	171%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	604758.9542	233993.4	158%	
Costa (1985)	20	82998.75981	233993.4	-65%	
Costa (1985) Enveloped Equation	21	382522.1474	233993.4	63%	
Mohamed e.t.	22	974322.4988	233993.4	316%	
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332	233993.4	-86%	
Xu and Zhang (2009)	24	500220.1863	233993.4	114%	

Tabla 110: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión
Fuente: Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

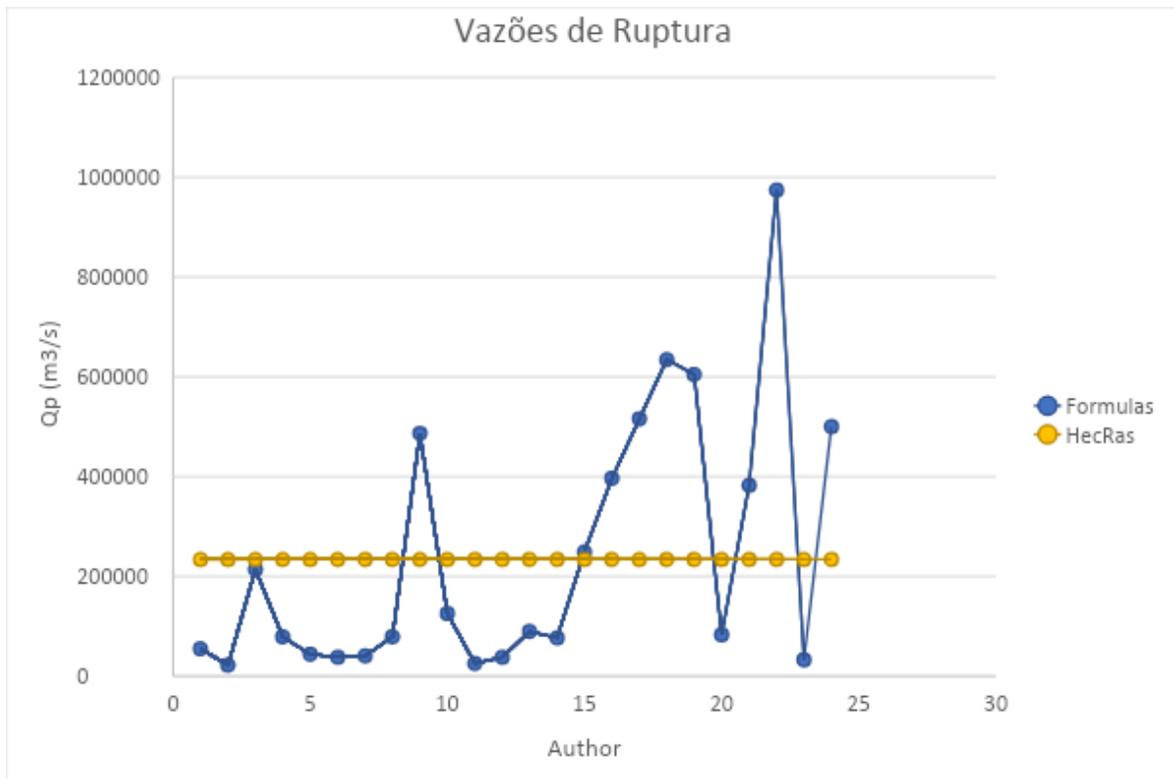


Figura 51: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Evans (1986) con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) Ecuación de la evoltoria con 10%
- Pierce (2008) con un 10%

12.3. Represa de Chavantes con ruptura por Piping

12.4.1. Caso 1

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	11
T(h)	0.1	p	1
NA max max	474	hw (dam)	64
b	499	C1*	1.7
B	849	C2*	1.35
m	2.52	Tr (h)	1
hbrecha	69.6	hr	15
hw (breach)	876.39		0.05
hdam	69.6	α_1	1.704894914
h min op	149.7	β_1	0.5
Breach base level	410	α_1	1
Nivel da base da barragem	410	α_2	4
Borda livre	5.6	Bd	11
Ab (m2)	42257.92	Veroded (m3)	9494664.96
Abrecha	46910.4	T(s)	360
Bt	393.8	B2	0.233
Y	98.85238095	B3	-0.139
Ko	1	B4	-1.549
A6	4404.65674	B5	-2.143
angulo	1.193029669	rad	68.35540501

Tabla 111: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos.

Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada, podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	51665.92787
Pierce (2008)	2	21427.3663
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	5309174.926
SCS (1981)	6	4614256.742
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606
NRCS apud	12	36388.44655
Froehlich (1995b)	13	2236041.194
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	223352.1891
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	723457.6831
Hagen (1982)	16	396596.823
Hagen (1982)	17	515589.7787
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	511473.4111
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	492564.7474
Costa (1985)	20	82998.75981
Costa (1985) Envolved Equation	21	382522.1474
Mohamed e.t.	22	766464
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332
Xu and Zhang (2009)	24	9754709.104
Macchione		
Macchione		
Mohamed.e.t.	25	1335431.538

Tabla 112: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, los datos de entrada necesarios se presentarán en el software HecRas, también el flujo máximo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		1
Descrição		CPS1
Parametro		Valor
Center Station of the breach		1315
Final Bottom Longitudinal Width		500
Final Bottom Elevation		410
Left Side Slope		2
Right Side Slope		3
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		10.86
Failure Mode		Piping
Piping Coefficient		0.5
Initial Piping Elevation		421
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		474
Top of Dam Elevation		479.6
Breach Bottom Elevation		391.8
Pool Elevation at Failure		474
Pool Volume at Failure		8800000
Dam Crest Width		11
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		0.9
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0.9
Earth Fill Type		Non-homogeneous or Rockfill
Dam Type		Dam with corewall
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	3500
	06/jan	3500
	07/jan	3500
	08/jan	
	09/jan	3500
	10/jan	3500
Maximum Flow		242941.7
Data		03/jan

Tabla 113: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante
Fuente: Autor

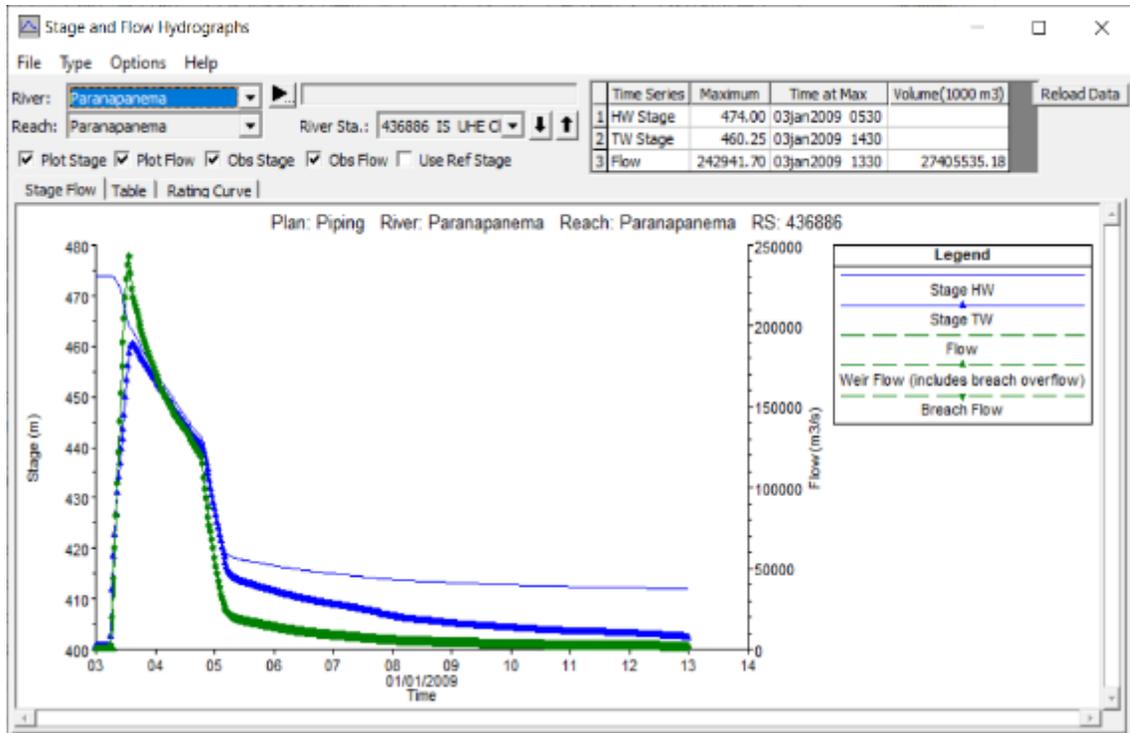


Figura 52: Hidrograma resultante del análisis en HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	51665.92787	242941.7	-79%	
Pierce (2008)	2	21427.3663	242941.7	-91%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	242941.7	-12%	0-20%
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	242941.7	-67%	
Bureau of reclamation (1982)	5	5309174.926	242941.7	2085%	
SCS (1981)	6	4614256.742	242941.7	1799%	
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236	242941.7	-83%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	242941.7	-67%	
Costa (1985)	9	486289.4272	242941.7	100%	
Evans (1986)	10	125505.3961	242941.7	-48%	0-50%
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606	242941.7	-90%	
NRCS apud	12	36388.44655	242941.7	-85%	
Froehlich (1995b)	13	2236041.194	242941.7	820%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	223352.1891	242941.7	-8%	0-10%
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	723457.6831	242941.7	198%	
Hagen (1982)	16	396596.823	242941.7	63%	
Hagen (1982)	17	515589.7787	242941.7	112%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	511473.4111	242941.7	111%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	492564.7474	242941.7	103%	
Costa (1985)	20	82998.75981	242941.7	-66%	
Costa (1985) Envolved Equation	21	382522.1474	242941.7	57%	
Mohamed e.t.	22	766464	242941.7	215%	
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332	242941.7	-87%	
Xu and Zhang (2009)	24	9754709.104	242941.7	3915%	
Macchione			242941.7		
Macchione			242941.7		
Mohamed.e.t.	25	1335431.538	242941.7	450%	

Tabla 114: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.
Fuente: Autor



Figura 53: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Evans (1986) con 50%
- Pierce (2008) con 20%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) con un 10%

12.4.2. Caso 2

- **Resultados obtenidos de las fórmulas propuestas**

A continuación, se muestra una tabla con los datos de entrada que se utilizarán

Aw (m3)	475000	475	km2
Vw (m3)	7750000000	7750	hm3
NA min op	559.7	hp	63.5
T(h)	0.1	p	1
NA max max	474	hw (dam)	64
b	499	C1*	1.7
B	849	C2*	1.35
m	2.52	Tr (h)	1
hbrecha	69.6	hr	15
hw (breach)	64.00		0.05
hdam	69.6	α₁	1.704894914
h min op	149.7	β₁	0.5
Breach base level	410	α₁	1
Nivel da base da barragem	410	α₂	4
Borda livre	5.6	Bd	11
Ab (m2)	42257.92	Veroded (m3)	9494664.96
Abrecha	46910.4	T(s)	360
Bt	393.8	B2	0.233
Y	98.85238095	B3	-0.139
Ko	1	B4	-1.549
A6	4404.65674	B5	-2.143
angulo	1.193029669	rad	68.35540501

Tabla 115: Datos de la presa a partir de la cual haremos los cálculos.
Fuente: Autor

Por tanto, con estos datos de entrada podemos calcular los valores numéricos resultantes de las fórmulas de cada autor, como podemos ver en la siguiente tabla.

Author	Number	Q(m3)
Pierce (2008)	1	51665.92787
Pierce (2008)	2	21427.3663
Pierce (2008)	3	214212.7318
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578
Bureau of reclamation (1982)	5	41924.34818
SCS (1981)	6	36436.86805
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578
Costa (1985)	9	486289.4272
Evans (1986)	10	125505.3961
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606
NRCS apud	12	36388.44655
Froehlich (1995b)	13	87135.64716
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	75987.86798
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	246776.4421
Hagen (1982)	16	396596.823
Hagen (1982)	17	515589.7787
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	511473.4111
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	492564.7474
Costa (1985)	20	82998.75981
Costa (1985) Envolved Equation	21	382522.1474
Mohamed e.t.	22	766464
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332
Xu and Zhang (2009)	24	347767.287
Macchione		
Macchione		
Mohamed.e.t.	25	129708.5773

Tabla 116: Caudales máximos calculados mediante las fórmulas propuestas por los investigadores. **Fuente:** Autor

- **Resultados obtenidos del software Hec-Ras**

A continuación, los datos de entrada necesarios se presentarán en el software HecRas, también el flujo máximo resultante del hidrograma (Figura)

Simulação		2
Descrição		CPS2
Parametro		Valor
Center Station of the breach		1315
Final Bottom Longitudinal Width		500
Final Bottom Elevation		410
Left Side Slope		2
Right Side Slope		3
Breach Weir Coefficient		1.44
Breach Formation Time (hrs)		10.86
Failure Mode		Piping
Piping Coefficient		0.5
Initial Piping Elevation		473.5
Trigger Failure at		WS Elev
Starting WS		474
Top of Dam Elevation		479.6
Breach Bottom Elevation		391.8
Pool Elevation at Failure		474
Pool Volume at Failure		8800000
Dam Crest Width		11
Slope of US Dam Face Z1 (H:V)		0.9
Slope of US Dam Face Z2 (H:V)		0.9
Earth Fill Type		Non-homogeneous or Rockfill
Dam Type		Dam with corewall
Dam Erodibility		High
Boundary conditions	05/jan	3500
	06/jan	3500
	07/jan	3500
	08/jan	3500
	09/jan	3500
	10/jan	3500
Maximum Flow		288736.3
Data		03/jan

Tabla 117: Datos de entrada para el software y su flujo máximo resultante
Fuente: Autor

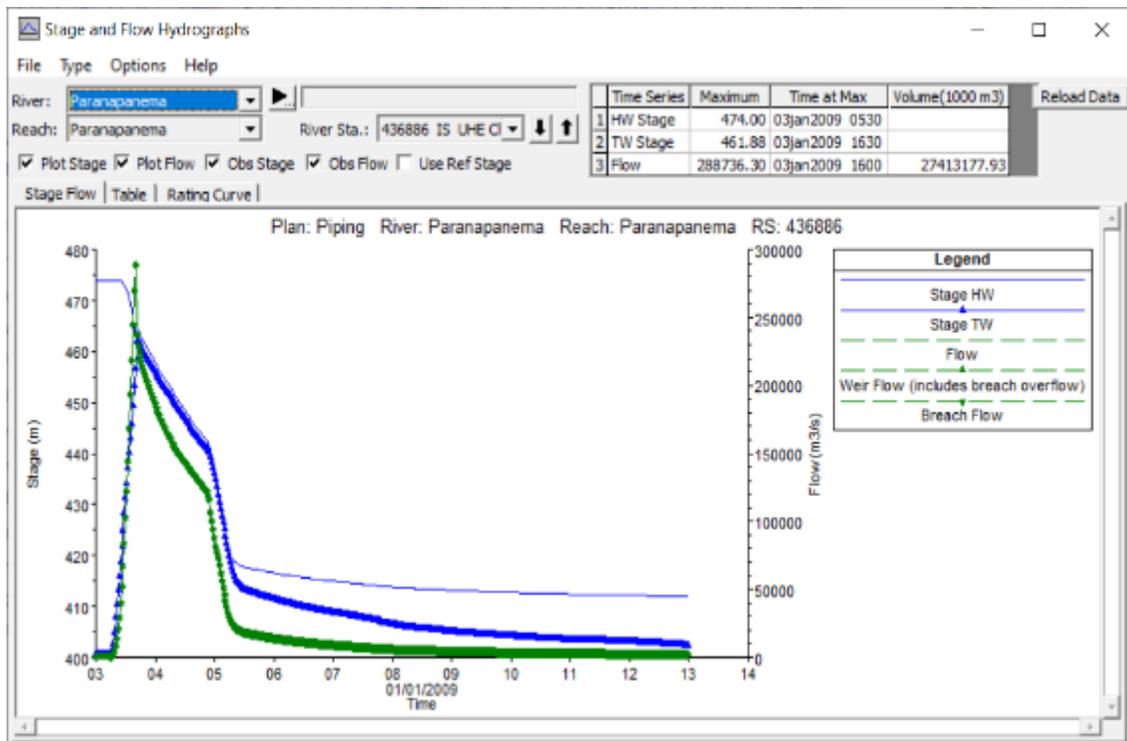


Figura 54: Hidrograma resultante del análisis HecRas
Fuente: Software HecRas

- **Análisis comparativo**

En esta tabla comparativa se puede observar la precisión de cada fórmula en comparación con el resultado obtenido por el software HecRas. Estos porcentajes se clasificaron en una escala del 10%, 20% o 50%.

Author	Number	Q(m3)	Q-HecRas(m3)	Diferença	Rango
Pierce (2008)	1	51665.92787	288736.3	-82%	
Pierce (2008)	2	21427.3663	288736.3	-93%	
Pierce (2008)	3	214212.7318	288736.3	-26%	0-50%
Singh and Snorrason (1984)	4	78961.38578	288736.3	-73%	
Bureau of reclamation (1982)	5	41924.34818	288736.3	-85%	
SCS (1981)	6	36436.86805	288736.3	-87%	
Singh and Snorrason (1984)	7	40703.92236	288736.3	-86%	
Singh and Snorrason (1984)	8	78961.38578	288736.3	-73%	
Costa (1985)	9	486289.4272	288736.3	68%	
Evans (1986)	10	125505.3961	288736.3	-57%	
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	11	25297.16606	288736.3	-91%	
NRCS apud	12	36388.44655	288736.3	-87%	
Froehlich (1995b)	13	87135.64716	288736.3	-70%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984)	14	75987.86798	288736.3	-74%	
MacDonald and Langridge - Monopolis (1984) Enveloped equation	15	246776.4421	288736.3	-15%	0-20%
Hagen (1982)	16	396596.823	288736.3	37%	0-50%
Hagen (1982)	17	515589.7787	288736.3	79%	
nt Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (19	18	511473.4111	288736.3	77%	
Vertedor de soleiro espessa (Singh, 1996)	19	492564.7474	288736.3	71%	
Costa (1985)	20	82998.75981	288736.3	-71%	
Costa (1985) Envolved Equation	21	382522.1474	288736.3	32%	0-50%
Mohamed e.t.	22	766464	288736.3	165%	
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	23	32647.47332	288736.3	-89%	
Xu and Zhang (2009)	24	347767.287	288736.3	20%	0-50%
Macchione			288736.3		
Macchione			288736.3		
Mohamed.e.t.	25	129708.5773	288736.3	-55%	

Tabla 118: Tabla comparativa de los caudales resultantes y su precisión.

Fuente: Autor

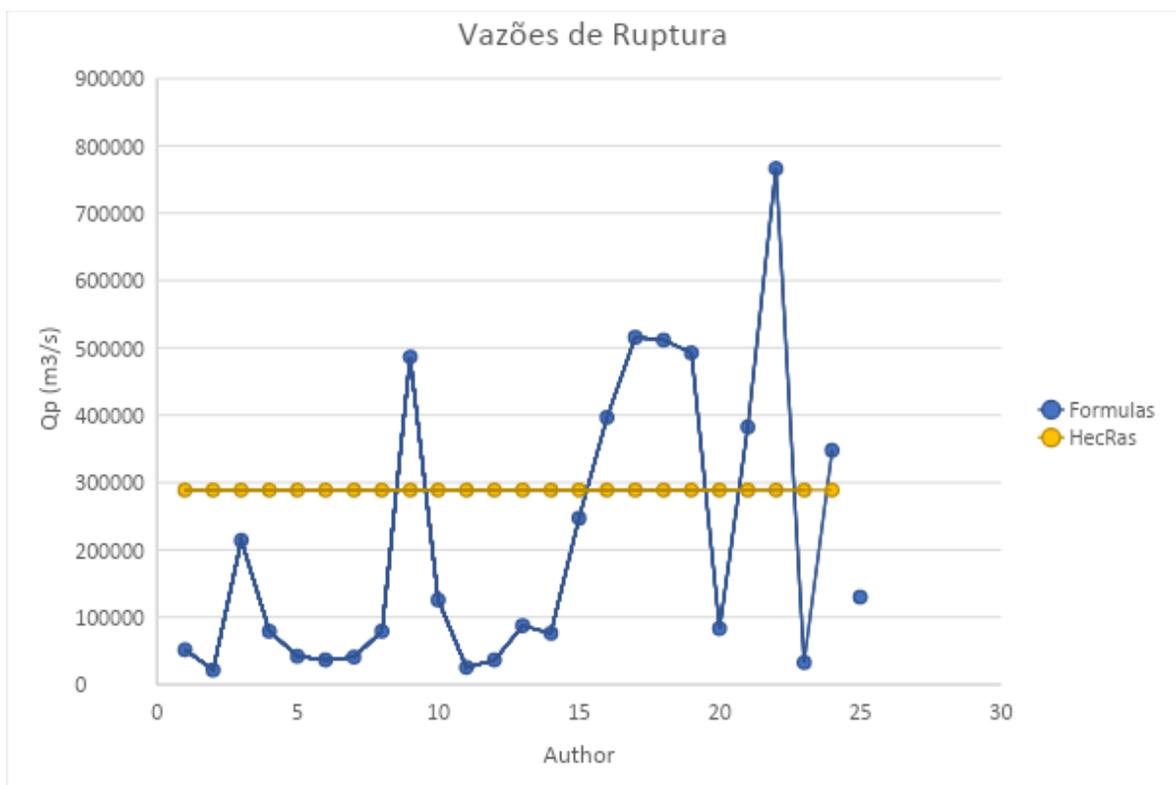


Figura 55: Distribución de los caudales máximos obtenidos por diferentes metodologías. **Fuente:** Autor

Además, podemos ver en el siguiente gráfico la distribución de los valores obtenidos por los diferentes procedimientos.

Por tanto, las fórmulas más adherentes al resultado de la simulación por HecRas son

- Hagen (1982) con 50%
- Pierce (2008) con 50%
- Xu y Zhang (2009) con 50%
- Costa (1985) Ecuación involucrada con 50%
- MacDonald y Langridge - Monopolis (1984) con 20%

13. Conclusiones finales y recomendaciones

Se han realizado estudios muy extensos a la bibliografía para obtener las fórmulas más relevantes para nuestra investigación. Se encontraron muchas referencias y las publicaciones más recientes tuvieron que ser limitadas. Por tanto, según el autor, se clasificó el año de publicación, la complejidad de la fórmula, la relevancia de la variable a calcular, si las variables involucradas estaban correctamente explicadas y los rangos de su aplicabilidad.

Además, se obtuvieron varias fórmulas para calcular el flujo máximo, el tiempo de formación de la brecha, el volumen erosionado, el área de la brecha, el ancho medio de la brecha, la tasa de erosión, la anchura y la altura de la brecha en función del tiempo y la tasa de flujo. del agua. Fueron clasificados en la siguiente tabla, pero no han sido estudiados, ya que el objetivo de la investigación es estudiar los caudales máximos por ruptura de represas.

Variavel a calcular	Quantidade de formulas pesquisadas	"n" variaveis para o calculo						
		n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	n=7
Vazão Pico	26	11	7	4	1	2	1	0
Tempo de Formação da Brecha	8	3	4	0	0	0	1	0
Volume Erodido	2	0	2	0	0	0	0	0
Área da Brecha	4	0	0	3	1	0		0
Largura média da Brecha	1	0	0	1	0	0		0
Taxa de Erosão	6	0	0	0	2	0	1	3
Largura da Brecha em função do tempo	4	0	0	0	1	1	2	0
Altura da Brecha em função do tempo	1	0	0	0	1	0	0	0
Taxa de Esgotamento da água	5	0	0	0	1	1	2	1

Tabela 119: Fórmulas para calcular el flujo máximo, el tiempo de formación de la brecha, el volumen erosionado, el área de la brecha, el ancho medio de la brecha, la tasa de erosión, la anchura y la altura de la brecha en función del tiempo y la tasa de flujo. del agua. **Fuente:** Autor

Por otro lado, las simulaciones en HecRas fueron extensas en el tiempo, ya que se colocaron varios datos de entrada para cada caso y el tiempo de salida de los datos del software es relativamente lento. Una vez obtenidos estos datos, se compararon con los calculados por las fórmulas propuestas, obteniendo un valor de precisión para uno de ellos según el caso que se esté ensayando. Por lo tanto, el análisis debe hacerse caso por caso, ya que la precisión varía según el caso. Se recomienda evaluar el caso que se estudiará y clasificarlo en algún caso explicado en este trabajo para saber qué fórmula es más precisa y adecuada para su proyecto. Con el fin de observar mejor cada pico de flujo calculado mediante el software HecRas, se dibujaron las siguientes gráficas, donde cada número del eje “x” representa el caso “x” analizado en la presa indicada en la misma figura.

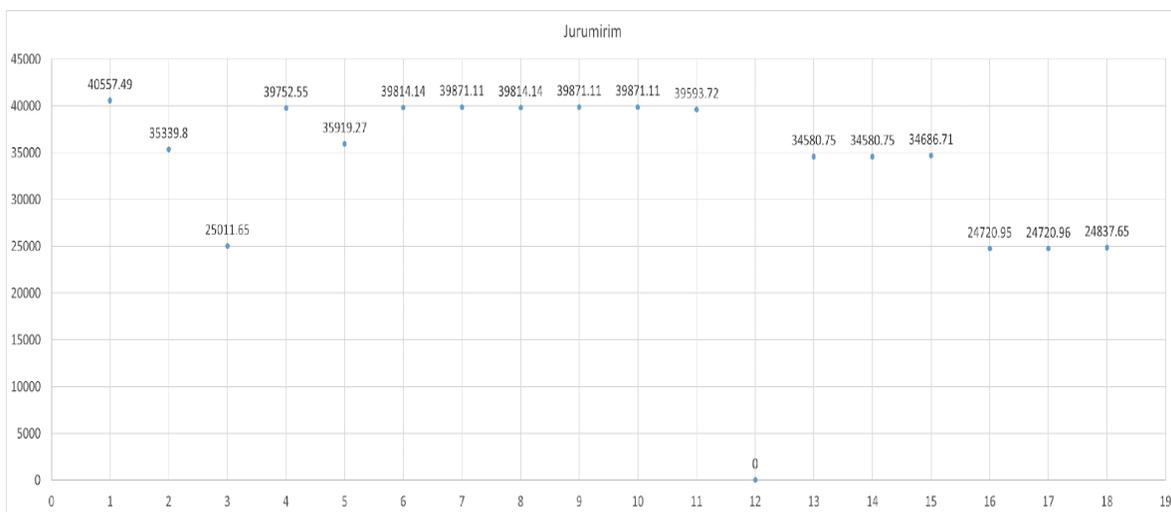


Figura 56: Distribución de los caudales máximos para cada caso en la presa Jurumirim calculada por el software HecRas **Fuente:** Autor

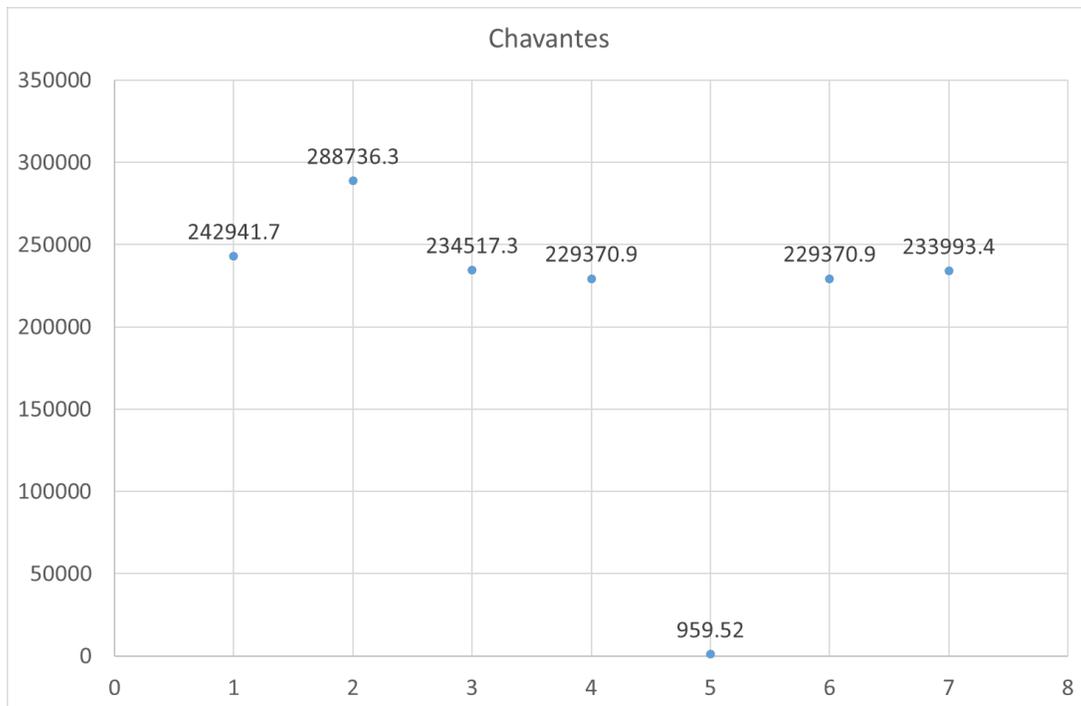


Figura 57: Distribución de flujo pico para cada caso en la presa Chavantes calculada por el Software HecRas. **Fuente:** Autor

14. Referencias bibliográficas

ANA, Agencia Nacional de Águas. Manual Básico Hec-Ras 5.0.3 para Ruptura de Barragens, 2018.

ANA, Agencia Nacional de Águas. Manual de Políticas de Segurança de Barragens para Entidades Fiscalizadoras, 2016.

ANA, Agencia Nacional del Agua. Reglamento de Seguridad de Presas Publicas de Embalse de Agua, 2019.

Association of State Dam Safety Officials. Summary of State Laws and Regulations on Dam Safety, 2000.

Association of State Dam Safety Officials. Summary of State Laws and Regulations on Dam Safety, 2000.

BRATER, E. Hydraulics.[In] Urquhart LC, ed: Civil Engineering Handbook. New York,McG'aw-Hill, p. 1-107, 1959.

COSTA, J. E. Floods from dam failures. US Geological Survey, 1985. v. 560).

FCTH, Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica; Duke-Energy Internacional. Modelação da Propagação de Cheias Ocasionadas por Rompimento de Barragens

na Cadeia de Geração do Rio Paranapanema, 2003.

FROEHLICH, D. C. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134, n. 12, p. 1708-1721, 2008.

FROEHLICH, D. C. Peak outflow from breached embankment dam. *Journal of water Resources Planning and management*, 121, n. 1, p. 90-97, 1995.

GRAHAM, W., Channel and Valley Changes Resulting from Dam Failure. *Proceedings of the 2nd CADAM Workshop*, Munique, Alemanha, 1998.

Hagen, V. K. Re-evaluation of design floods and dam safety. *14th Congress of Int. Commission on Large Dams*, 1982.

LAURIANO, A. W. Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS. 2009.
Estimativa de vazões Efluentes de Ruptura de Barragens de Aterro

MACCHIONE, F. Model for predicting floods due to earthen dam breaching. I: Formulation and evaluation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134, n. 12, p. 1688-1696, 2008.

MACDONALD, T. C.; LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. Breaching characteristics of dam failures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, n. 5, p. 567-586, 1984.

Mbajjorgu, C. C. Flood Inundation Simulation using HEC-RAS Hydrologic Model: A Case Study of Oyun River, Nigeria; 2017.

MOHAMED, M.; SAMUELS, P.; MORRIS, M. Uncertainties In Dam Failure Modelling With The US NSW BREACH Model. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 50, 2001.

Oliveira, R A F. Propagação de Ondas de Despacho e Controle de Inundações da bacia do Paraíba do Sul. Dissertação - Msc. Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2005.

PIERCE, M. W.; THORNTON, C. I.; ABT, S. R. Predicting peak outflow from breached embankment dams. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15, n. 5, p. 338-349, 2010.

Silva, T. A. D. Modelagem hidráulica do canal do Rio Granjeiro, Crato/CE, utilizando o programa computacional HEC-RAS, 2013.

SINGH, V. *Dam Breach Modeling Technology*, 1996. Kluwer, Dordrecht, the Netherlands.

SINGH, V. P. *Dam breach modeling technology*. Springer Science & Business

Media, 2013. 9401587477.

Singh, V. P. Dam breach modeling technology. Springer Science & Business Media, 2013.

USDA, United States Department of Agriculture. Earth Dams and Reservoirs TR-60. Conservation Engineering Division, 2005.

XU, Y.; ZHANG, L. Breaching parameters for earth and rockfill dams. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135, n. 12, p. 1957-1970, 2009.

15. Anexos
15.1. Plantilla de los métodos de los cuadros

CAUSAS

- Dificultad en estudiar la gran cantidad de variables de las cuales dependen el mapa de inundación y parámetros de ruptura
- Instrumentos con tecnología insuficiente e incertidumbre en la teoría que permitan recopilar y estudiar los datos analizados

MÉTODO AQP

- A: Central hidroeléctrica Chavantes en São Paulo (Estudio de Caso)
- Q: Estimación del caudal de la ruptura de represas
- P: La estimación de proyectos es impreciso

CONSECUENCIAS

- Retraso del proyecto
- Cálculos imprecisos

APORTE

- Implementación del software HecRas

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable dependiente
¿La implementación del software HecRas mejorará la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas?	Implementar el software HecRas para identificar las fórmulas más precisas propuestas por los autores	La implementación del software HecRas permitirá identificar las fórmulas más precisas propuestas por los autores	Estimación de proyectos
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable independiente
¿Cómo es la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras antes de la implementación del software HecRas?	Describir la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas antes de la implementación del software HecRas	La implementación del software HecRas mejorará la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la primera etapa de colocación de datos de entrada	Software HecRas
¿La implementación del software HecRas mejorará la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la primera etapa de colocación de datos de entrada?	Implementar el software HecRas para mejorar la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la primera etapa de colocación de datos de entrada	La implementación del software HecRas mejorará la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la segunda etapa de realización de simulaciones	
¿La implementación del software HecRas mejorará la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la segunda etapa de realización de simulaciones?	Implementar el software HecRas para mejorar la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras en la segunda etapa de realización de simulaciones		
¿Cómo es la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas brasileras después de la implementación del software HecRas?	Describir la estimación de proyectos en centrales hidroeléctricas después de la implementación del software HecRas		