

# 1 Demostración de la ecuación diferencial

Tenemos que  $\beta$  es inversamente proporcional a  $\sqrt{P}$ , igual que  $\delta$

$$\beta = \frac{b}{\sqrt{P}} \quad y \quad \delta = \frac{d}{\sqrt{P}}$$

Y que el crecimiento poblacional es proporcional a la población

$$\frac{dP}{dt} = mP$$

Dicha constante de proporcionalidad será la diferencia de las tasas de natalidad y mortalidad

$$m = \beta - \delta$$

Sustituyendo beta y delta

$$\frac{dP}{dt} = \left(\frac{b}{\sqrt{P}} - \frac{d}{\sqrt{P}}\right)P$$

$$\frac{dP}{dt} = \left(\frac{b-d}{\sqrt{P}}\right)P$$

Digamos que  $k = b - d$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{kP}{\sqrt{P}}$$

Racionalizando queda

$$\frac{dP}{dt} = k\sqrt{P}$$

$$\frac{dP}{\sqrt{P}} = kdt$$

Integrando ambos miembros respecto a x

$$\int \frac{dP}{\sqrt{P}} = \int kdt$$

$$2\sqrt{P} = kt + C$$

$$\sqrt{P} = \frac{kt+C}{2}$$

$$P = \left(\frac{kt+C}{2}\right)^2$$

$$P = \left(\frac{kt}{2} + \frac{C}{2}\right)^2$$

$$P(0) = \left(\frac{k0}{2} + \frac{C}{2}\right)^2$$

$$P(0) = \frac{C^2}{4}$$

$$C = 2\sqrt{P(0)}$$

Sustituyendo C

$$P = \left(\frac{kt}{2} + \sqrt{P(0)}\right)^2$$

Por lo que queda demostrada la ecuación diferencial.

## 2 Valores iniciales

Tenemos que  $P(0) = 100$  y que  $P(6) = 169$ .

Entonces  $P(12) = ?$

El objetivo es hallar la  $k$  que permite que la función pase por esos 3 puntos.

Como  $P(6) = 169$  y  $P(0) = 100$ :

$$P(6) = \left(\frac{k6}{2} + \sqrt{P(0)}\right)^2 = 169$$

$$(3k + \sqrt{100})^2 = 169$$

$$(3k + 10)^2 = 169$$

$$\sqrt{(3k + 10)^2} = \sqrt{169}$$

$$3k + 10 = 13$$

$$3k = 3$$

$$k = 1$$

Teniendo  $k$ , tenemos la ecuación completamente en función de  $t$

Evaluando  $P(12)$ :

$$P(12) = \left(\frac{12}{2} + 10\right)^2$$

$$P(12) = (16)^2$$

$$P(12) = 256$$

Dentro de un año (12 meses) habrán 256 peces en el lago.

## 3 Campo de isoclinas

A continuación, se ilustra el campo de isoclinas de la ecuación diferencial

$$\frac{dP}{dt} = k\sqrt{P}$$
 donde se tomó  $k = 1$ .

Se muestran varias soluciones con diferentes valores de población inicial

Como la población de peces aumenta con el paso del tiempo, la tasa de

natalidad es mayor que la de mortalidad, por lo que la constante  $k$

debe ser positiva para que las isoclinas sean crecientes. En la figura

se muestra como la función del ejercicio, con  $P(0) = 100$  y  $k = 1$ , cumple

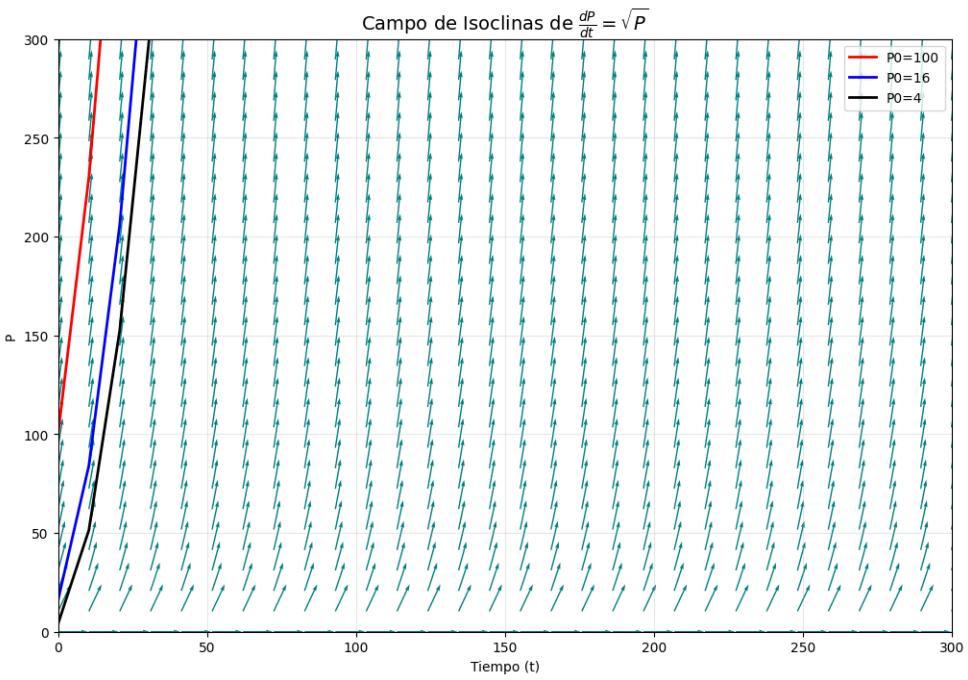
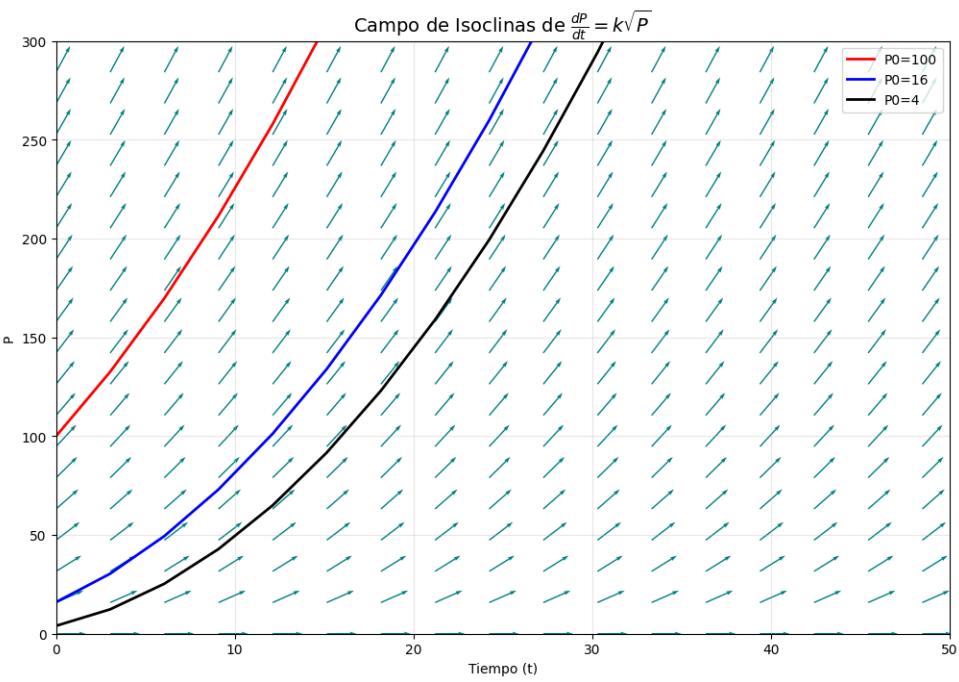
además las otras dos condiciones,  $P(6) = 169$  y  $P(12) = 256$

Para poblaciones pequeñas el crecimiento es demasiado lento, y acelerado

para poblaciones medianas o grandes. Los únicos puntos críticos son  $P=0$ ,

donde la población se extingue. No hay límite superior en el modelo.

**Ver Isoclinas.ipynb**



## 4 Planteamiento del Problema

Para cada solución particular del problema, o sea, para un  $k$  y  $P(0)$  específicos, sabemos que:

- La función solución  $P(t) = (kt/2 + \sqrt{P(0)})^2$  tiene como dominio todas las  $t > t_0$ , ya que no tiene límite superior, por lo que para cualquier  $t$  habrá una  $P$  solución.
- $P(t)$  es inyectiva, como muestra la gráfica, garantizando la unicidad de las soluciones.
- $P(t)$  es continua y diferenciable, descartando cualquier inestabilidad en las soluciones

Pero en  $P = 0$  es una zona de puntos críticos, llegar aquí significa la extinción de la especie y la función se volvería constante en 0 como muestran los isoclinas( $P(t)=0$ ), esto descartaría la unicidad.

**En resumen:** El problema estará bien planteado siempre que ningún factor lleve a  $P(t)=0$ , por ejemplo:  $k = 0$  o  $P(0) = 0$ .

## 5 Condicionamiento del Problema

Dado:  $\frac{dP}{dt} = \sqrt{P}$ ,  $P(0) = 100$  Solución:  $P(t) = \left(\frac{t}{2} + 10\right)^2$

Para la solución  $P(t) = \left(\frac{t}{2} + 10\right)^2$ , el número de condición respecto a perturbaciones en  $t$  es:

$$\text{cond}(P, t) = \left| \frac{t \cdot P'(t)}{P(t)} \right| = \frac{2t}{t + 20}$$

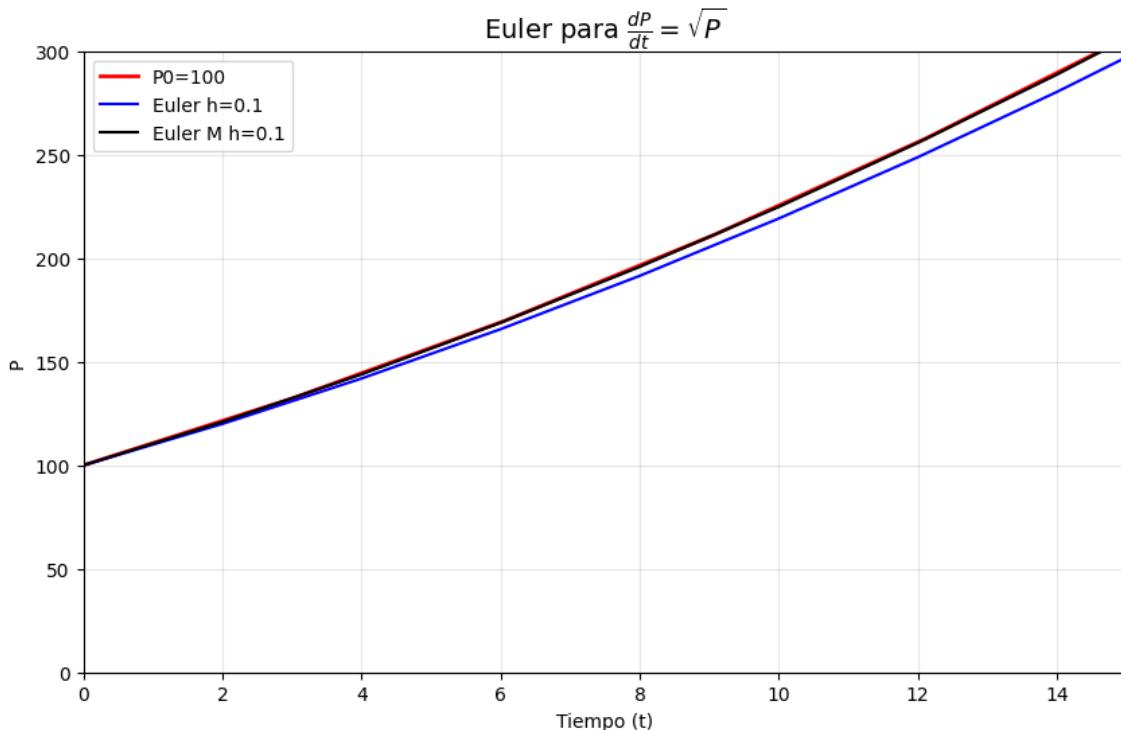
- $t = 0$ : cond = 0 (insensible)
- $t = 10$ : cond  $\approx 0.67$  (buen condicionamiento)
- $t \rightarrow \infty$ : cond  $\rightarrow 2$  (condicionamiento moderado)

**Interpretación:** Para  $t$  grandes, un error del 1% en  $t$  produce aproximadamente un 2% de error en  $P(t)$ .

## 6 Métodos numéricos y errores

En este apartado se emplean dos métodos numéricos para el mayor análisis del problema, y como otras vías de solución. Estos son el método de Euler y el método de Euler Mejorado, también conocido como método de Heun.

[Ver Euler y Euler Mejorado.ipynb](#)



Del gráfico comparativo se aprecia como Euler mejorado (línea negra) logra mucha mayor precisión que el de Euler (línea azul). Euler mejorado es más preciso siendo de orden 2, calculando dos pendientes y hallando su promedio en cada iteración, si se reduce h a la mitad, el error se reduce a la cuarta parte. En cambio, el método de Euler es de orden 1 y es más sencillo el cálculo de cada iteración, calculando solo una pendiente, si h se reduce a la mitad, el error también se reduce a la mitad. Ambos métodos tienen complejidad temporal O(n), donde n es el número de iteraciones a realizar, aunque Euler mejorado realice más trabajo por iteración.

Ahora, analizaremos los errores absolutos, relativos, hacia adelante y hacia atrás de estos métodos comparados con la solución exacta.

- Error absoluto: Se calcula como la diferencia entre la solución exacta y la aproximada:  $\Delta y = |y - \hat{y}|$

El error absoluto de las primeras 5 iteraciones de ambos métodos:

0.000000 0.000000

0.062500 0.000762

0.126525 0.001525

0.192038 0.002288

0.259006 0.003052

- Error relativo: Es el cociente del error absoluto con la solución exacta:

$$\Delta y = \left| \frac{y - \hat{y}}{y} \right|$$

El error relativo de las primeras 5 iteraciones de ambos métodos:

0.000000 0.000000

0.000595 0.000007

0.001148 0.000014

0.001662 0.000020

0.002141 0.000025

- Error hacia adelante: Diferencia entre la solución exacta y la solución aproximada perturbada:  $\Delta y = |y(x) - \hat{y}(x + \epsilon)|$

Ya sabemos que  $P(12) = 256$  con  $P(0) = 100$ , veamos con  $\epsilon = 0.1$ :

$$P_\epsilon(t + \epsilon) = \left(\frac{t}{2} + \sqrt{100}\right)^2$$

$$P_\epsilon(12.1) = \left(\frac{12.1}{2} + 10\right)^2$$

$$P_\epsilon(12.1) = (16.05)^2$$

$$P_\epsilon(12.1) = 257.6025$$

$$\Delta y = |y(P(0)) - \hat{y}(P(0) + \epsilon)|$$

$$\Delta y = |256 - 257.6025|$$

$$\Delta y = 1.6025$$

El error de 0.1 mes se amplifica a 1.6 peces después de un año.

- Error hacia atrás: Dado un resultado aproximado  $\hat{P}$ , buscar la perturbación  $\epsilon$  en la entrada tal que:  $P(t + \epsilon) = \hat{P}$

Tomemos el mismo ejemplo del error hacia adelante

$$P(12 + \epsilon) = 257.6025$$

$$P(t) = \left(\frac{t}{2} + 10\right)^2$$

$$t = 2(\sqrt{P(t)} - 10)$$

$$12 + \epsilon = 2(\sqrt{257.6025} - 10)$$

$$\epsilon = 2(16.05 - 10) - 12$$

$$\epsilon = 12.1 - 12$$

$$\epsilon = 0.1$$

La perturbación de 0.1 meses es el error hacia atrás para lograr la población de 257.6025.