

Regla de L'Hopital para sucesiones

*Original*

Regla de L'Hopital para sucesiones / DI SCALA, ANTONIO JOSE'; A., J.. - 13:(1998), pp. 15-20.

*Availability:*

This version is available at: 11583/1660768 since:

*Publisher:*

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

## Regla de l'Hôpital para sucesiones

Antonio J. Di Scala

Post print (i.e. final draft post-refereeing) version of an article published on *Revista de Educacion de la Union Matematica Argentina* 13, Nro. 1, p. 15-20, (1998).

Beyond the journal formatting, please note that there could be minor changes from this document to the final published version. The journal is accessible from here:

[http://www.famaf.unc.edu.ar/rev\\_edu](http://www.famaf.unc.edu.ar/rev_edu)

El propósito de este artículo es mostrar una versión para sucesiones, de la Regla de l'Hôpital, en la cual el papel de las derivadas lo juegan las diferencias.

La versión de la regla de l'Hôpital, en el caso de funciones es :

Si dos funciones  $f$  y  $g$  de  $\mathbf{R}$  en  $\mathbf{R}$ , tienen las siguientes propiedades:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} g(x) = \infty$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \alpha$$

Entonces

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{g(x)} = \alpha$$

El primer enunciado se adjudica a Otto Stolz, alumno de Karl Weierstrass.

**“Criterio de Stolz”.**

Sea  $\{a_n\}$  una sucesión arbitraria y  $\{b_n\}$  una sucesión creciente y divergente.

Si existe

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n}$$

Entonces también existe

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n}$$

y además

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n}$$

Una demostración es como sigue :

Primero escribimos

$$\frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = \alpha + \epsilon_n$$

donde  $\epsilon_n$  tiende a cero cuando  $n$  tiende a infinito y  $\alpha$  es el límite del cociente.

Luego

$$a_{n+1} - a_n = \alpha \cdot (b_{n+1} - b_n) + \epsilon_n \cdot (b_{n+1} - b_n)$$

Si sumamos en ambos miembros desde  $n = 1$  hasta  $n = N - 1$  resulta :

$$a_N - a_1 = \alpha \cdot (b_N - b_1) + \sum_{n=1}^{N-1} \epsilon_n \cdot (b_{n+1} - b_n)$$

podemos suponer  $a_1 = b_1 = 0$  , ahora si dividimos por  $b_N$  se obtiene :

$$\frac{a_N}{b_N} = \alpha + \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\epsilon_n \cdot (b_{n+1} - b_n)}{b_N} = \alpha + R_N$$

donde

$$R_N = \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\epsilon_n \cdot (b_{n+1} - b_n)}{b_N}$$

afirmamos que :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R_N = 0$$

en efecto, podemos escribir :

$$R_N = \sum_{n=1}^K \frac{\epsilon_n \cdot (b_{n+1} - b_n)}{b_N} + \sum_{n=K+1}^{N-1} \frac{\epsilon_n \cdot (b_{n+1} - b_n)}{b_N}$$

tomando valor absoluto y usando la desigualdad del triángulo se tiene :

$$|R_N| \leq \sum_{n=1}^K \frac{|\epsilon_n| \cdot |(b_{n+1} - b_n)|}{|b_N|} + \sum_{n=K+1}^{N-1} \frac{|\epsilon_n| \cdot |(b_{n+1} - b_n)|}{|b_N|}$$

como los  $\epsilon_n$  tienden a cero, podemos encontrar una constante  $M$  que los acota y dado un  $\epsilon > 0$  un  $N_0$  a partir del cual  $|\epsilon_n| \leq \epsilon$ .

Haciendo  $K = N_0$ , obtenemos :

$$|R_N| \leq \sum_{n=1}^{N_0} \frac{M \cdot |(b_{n+1} - b_n)|}{|b_N|} + \sum_{n=N_0+1}^{N-1} \frac{\epsilon \cdot |(b_{n+1} - b_n)|}{|b_N|}$$

como la sucesión  $b_n$  es creciente podemos sacar los valores absolutos, obteniendo sumas telescópicas, luego de cancelar obtenemos :

$$|R_N| \leq M \cdot \frac{|b_{N_0+1}|}{|b_N|} + \epsilon \cdot \frac{(b_N - b_{N_0+1})}{|b_N|} \leq M \cdot \frac{|b_{N_0+1}|}{|b_N|} + \epsilon$$

finalmente como  $b_N$  es divergente, agrandando  $N$  de manera que

$$M \cdot \frac{|b_{N_0+1}|}{b_N} \leq \epsilon$$

resulta :

$$|R_N| \leq 2\epsilon$$

lo cual termina la demostración.

Veamos una bonita aplicación, definamos la sucesión  $\{x_n\}$  de la siguiente manera :

$$x_n = \begin{cases} 1 & , \text{ si } n = 1 \\ \text{seno}(x_{n-1}) & , \text{ si } n > 1 \end{cases}$$

es decir las iteradas de la función seno a partir del 1.

La cuestión es calcular :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n^2 \cdot n$$

Para ello escribimos  $a_n = n$  y  $b_n = \frac{1}{x_n^2}$  resultando :

$$x_n^2 \cdot n = \frac{a_n}{b_n}$$

Sin detenernos en el hecho de que la sucesión  $\{b_n\}$  sea creciente y divergente, calculamos :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n}$$

escribimos:

$$\frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = \frac{(n+1) - n}{\frac{1}{x_{n+1}^2} - \frac{1}{x_n^2}} = \frac{x_{n+1}^2 \cdot x_n^2}{x_n^2 - x_{n+1}^2}$$

usando el desarrollo de Mac-Laurin de la función seno se obtiene :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{x_n^3}{6} + \dots$$

reemplazando llegamos a:

$$\begin{aligned} \frac{x_{n+1}^2 \cdot x_n^2}{x_n^2 - x_{n+1}^2} &= \frac{x_n^2 \cdot (x_n - \frac{x_n^3}{6} + \dots)^2}{x_n^2 - (x_n - \frac{x_n^3}{6} + \dots)^2} = \frac{(x_n - \frac{x_n^3}{6} + \dots)^2}{1 - (1 - \frac{x_n^2}{6} + \dots)^2} = \\ &= \frac{x_n^2 \cdot (1 - \frac{x_n^2}{6} + \dots)^2}{(\frac{x_n^2}{6} + \dots) \cdot (2 - \frac{x_n^2}{6} + \dots)} = \frac{(1 - \frac{x_n^2}{6} + \dots)^2}{(\frac{1}{6} + \dots) \cdot (2 - \frac{x_n^2}{6} + \dots)} \end{aligned}$$

finalmente tomando límite cuando  $n$  tiende a infinito y usando que  $\{x_n\}$  tiende a cero, llegamos a que :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1}^2 \cdot x_n^2}{x_n^2 - x_{n+1}^2} = \frac{1}{\frac{1}{6} \cdot 2} = 3$$

es decir :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n^2 \cdot n = 3$$

el crecimiento y divergencia de la sucesión  $\{b_n\}$  resultan de la desigualdad  $0 \leq \text{seno}(x) \leq x$  válida en el intervalo  $[0, 1]$  que garantizan que  $\{x_n\}$  sea decreciente y tenga límite. Este límite es cero por ser cero el único punto fijo de la función seno en este intervalo.

Volviendo nuevamente la vista al “Criterio de Stolz”, el siguiente ejemplo muestra que la hipótesis sobre el crecimiento de las  $\{b_n\}$ , no puede, en principio, obviarse :

$$a_n = n$$

$$b_n = n + (-1)^n \cdot \sqrt{n}$$

en este caso los límites dan :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = 0$$

y

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = 1$$

pero analizando la demostración resulta que solo necesitamos que estén acotadas las sumas :

$$\sum_{n=K+1}^{N-1} \frac{|(b_{n+1} - b_n)|}{|b_N|}$$

por una constante que no dependa ni de  $K$  ni de  $N$ .

Dicho esto enunciamos esta generalización como sigue :

Sean  $\{a_n\}$  y  $\{b_n\}$  dos sucesiones. Supongamos que  $\{b_n\}$  es divergente y que existe una constante  $H$  tal que :

$$\sum_{n=1}^{N-1} \frac{|(b_{n+1} - b_n)|}{|b_N|} \leq H \text{ para todo } N$$

Si existe

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n}$$

Entonces también existe

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n}$$

y además

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n}$$

Para finalizar, me parece adecuado comentar que la necesidad de aclarar estas ideas nació en una discusión de la solución de un problema de la competencia Paenza, mantenida entre Luis Silvestre, Martín Sombra y el autor.

### **Bibliografía.**

Una demostración diferente del “Criterio de Stolz” no generalizado puede hallarse en el libro de E. Linés Escardó titulado “Principios de Análisis Matemático ” editorial Reverté. Aquí el “Criterio” se deduce como un caso particular del método de sumación de Töplitz.

Facultad de Matemática, Astronomía y Física

Universidad Nacional de Córdoba

5000 Córdoba.